

ブロイラーの生産性能に対する
飼料の代謝エネルギーとタンパク質・アミノ酸バランスに関する研究

Study on metabolic energy and protein / amino acids balance
in diet for modern broiler performances

2019.3

東京農工大学大学院 連合農学研究科
生物生産科学専攻 動物生産科学大講座

石 井 俊 行

目 次

第1章

緒論	1
----	---

第2章

高増体ブロイラーの肥育後期における配合飼料中の代謝エネルギー (ME)、 粗タンパク質 (CP) および理想的タンパク質としての必須アミノ酸 (AA) の含量が 増体重および飼料要求率 (FCR) に及ぼす影響	11
第1節 ME および CP の強化が増体重および FCR に及ぼす影響	12
第2節 有効 AA の強化が増体重および FCR に及ぼす影響	24
第3節 ME の設定水準が FCR に及ぼす影響	33
第4節 ME および有効 AA の設定水準が FCR に及ぼす影響	49

第3章

ブロイラー配合飼料におけるリジン強化に関する検討	70
第1節 リジンおよび含硫アミノ酸含量の強化が FCR に及ぼす影響	71
第2節 リジン含量の段階的強化が FCR に及ぼす影響	80
第3節 リジン含量強化時のスレオニンならびにアルギニンの適正比率の検討	92
第4節 リジン含量の大幅な強化および適切なスレオニン比率の検討	104

第4章

血漿メタボローム解析による FCR を改善する血中マーカーの探索	113
----------------------------------	-----

第5章

総合考察	131
------	-----

参考文献・引用文献	137
-----------	-----

謝辞	149
----	-----

第 1 章

緒論

緒 論

1. ブロイラーを取り巻く環境と世界的な需要や要求の高まり

ブロイラーとは食肉用の若鶏の総称であり、「broil（直火焼き）」から名づけられたものとされる。このブロイラーは米国を発祥の地とし、現在では欧米だけでなく世界的な肉専用種として大きなシェアを有している。特にブロイラー種鶏は生産性を向上させることを第一目的として大型化への育種改良が進められてきた。そのため、鶏肉は安価な動物性タンパク質の供給源として現代の食生活には欠かせないものとなっている。実際に Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) が公開している FAO STAT (2018) によると 2016 年のブロイラーの世界総飼養羽数は約 227 億羽を超えており、10 年前の 2006 年の約 176 億羽から約 51 億羽の増羽と 1.29 倍に伸張していることがわかる（図 1-1）。生産量において、取り分け中国での増加は目を見張るものがあるが、米国やブラジルといった元来産業の中心となっていた国々における生産量の増加だけでなく、アジア諸国やアフリカ諸国等の発展途上国における生産量の高まりも寄与していることが推察される（図 1-2）。国土交通省発刊の「多様な食文化・食習慣を有する外国人客への対応マニュアル」（2008）によると、国と地域によって多少異なるものの、ベジタリアン、イスラム教徒、仏教、キリスト教、ユダヤ教徒、ヒンドゥー教ならびにジャイナ教において、肉食全般が禁止されているヒンドゥー教およびジャイナ教を除き、鶏肉は宗教上適切な処理が施されていれば食することができる宗教（たとえばイスラム教徒向けのハラール認証など）も多いことが取りまとめられている。また、鶏肉は菜食主義とされるベジタリアンでも食することが可能とされているケースもあり、宗教的な制約を受け難い観点からも動物性タンパク質として受け入れやすいものと考えられる。さらに、鶏肉の価格は牛肉や豚肉と比較して安価であることから需要を押し上げているものと推察されるが、独立行政法人農畜産業振興機構（ALIC）の調査によると、タイのように鶏肉の国内価格を政策的に低く抑えることで需要の喚起を図り、意図的に鶏肉の消費量を底上げしている国もあるようである（ALIC『畜産の情報』（海外編））。これらの宗教的な観点や肉として

安価である観点から、発展途上国内におけるブロイラーの肉食文化が広まってきたこともブロイラー生産数量の数字の押し上げに繋がっている可能性が示唆される。

一方、国際連合（United Nations）が発表している「World Population Prospects, 2017 Revision」における世界の推計人口は 1960 年初頭で 30 億人と推定されていたが、2016 年には 74 億人を超えており、約 2.5 倍に増加している。今後、2055 年には 100 億人に達するとの予測もあり、食物不足が懸念され始めて久しい今日となった。農林水産政策研究所の報告「世界の食料需給の動向と中長期的な見通し」によると、2016 年における世界全体の穀物需要量は世界人口の伸び率を上回って増加しており、1960 年比で人口 2.5 倍に対し、小麦 3.2 倍、米 3.1 倍、とうもろこし 5.3 倍ならびに大豆 7.2 倍（大豆のみ 1970 年比）に伸長している。上述の報告内では、2027 年時点で予想される穀物の収穫面積は 2014-2016 年から横ばいで 7.0 億 ha となり、同様に単収は 3.6t/ha から 4.2t/ha と 16.4% 伸長し、その結果、生産量は 2,501 百万 t から 2,912 百万 t と 16.4% 増加するものと見通されている。しかしながら、所得向上等による主要品目の消費量の増加率の見通しは品目により異なり、穀物消費量と比較して植物油消費量、乳製品や肉類等の畜産物消費量の増加率が高い傾向にあるものと見られている。つまり、世界人口の伸び率よりも穀物需要の伸び率が高まっている理由は畜産物需要の増加も関係しているものと推察される。世界の人口増加と共に、穀物生産量は品種改良、灌漑、肥料や農薬の利用によって増加したものの需要の増加が著しい。現状予測では穀物単収は増加する見込みであるが、今後は農地の劣化等もあり極端な増産が見込めなくなるとの予測もある。したがって、ブロイラーを含む家畜および家禽のエサとなる配合飼料の主原料である穀物は先々において逼迫していくことが予想される。しかしながら先述の通り、今後もブロイラーの世界的な需要は高まるものと推定されており、成長性の著しいブロイラー産業を支えるためには、より生産効率が高く、かつ持続可能な育種システムを踏まえた生産体制が求められる。すなわち、鶏肉生産においては、より少ない穀物量により多くの産肉性を向上させる手法が一番に望まれており、羽当たりの飼料給与量の削減による飼料要求率（Feed Conversion Ratio, FCR）の改善や可食部の歩留まり改善が重要性を増すといえる。

2. ブロイラーの育種改良による生産性の改善と配合飼料の現状

ブロイラー種鶏は各種鶏メーカーによって恒常的に生産性改善の取り組みが続けられており、飼料栄養の研究も生産性向上のために日々続けられている。その結果、年々ブロイラーの増体性能が改善し出荷日齢は短縮され、飼料効率も改善する傾向にある。日本国内でも多く生産されている Aviagen 社の ROSS308 ライン（チャンキー）の 1996 年度版と 2014 年度版の生産マニュアルを比較すると、出荷体重である 3kg に到達する日齢は各々 54 日齢から 44 日齢、そのときの FCR は 1.95 から 1.73 と大幅に改善している。Aviagen 社によると、2014 年時点での今後の育種改良目標について、1 年当たりの出荷時体重で 40～50g、FCR で 0.02～0.03 の改善としており、将来的には 2kg の鶏では FCR を 1.0 とすることを目標に掲げていることを公表している。また、二大ブロイラー種鶏メーカーである Aviagen 社ならびに Cobb-Vantress 社は、現場に即した育種選抜方法の新規導入や改良を継続的に行っており、近年では共に商業的育種プログラムとして種鶏の改良においてゲノム選抜の手法を導入している。たとえば、Aviagen 社では 2000 年頃から兄弟検定を導入し、さらに鶏にとってストレスとなるあらゆる環境（無薬、低栄養飼料、古床の使用、空舎期間の短期化、疾病暴露、低照度、野外同様の収容密度および粗放的な管理）での飼育選抜をすることによって増体性能の改善を図っている。また、種鶏の改良においては、上位の選抜候補鶏（GGPS）由来の種鶏成績および良好・劣悪環境下で飼育したブロイラーの生産成績や屠体形質の表現型レベルの情報からの選抜だけでなく、遺伝子レベルの情報を組み合わせたゲノミクスによる選抜も導入している。このゲノム選抜によって、ヘンハウス産卵個数を改善するための選抜精度は、従来評価法では 0.40 であったがゲノム評価法により 0.62 まで改善したことを報告している（日本チャンキー協会 第 95 回技術ゼミナール）。Aviagen 社としては、従来評価法では選抜時点では産卵成績やオスの成績は明らかでないが、ゲノム選抜の導入により繁殖形質の選抜が可能となったことで、今後、飛躍的に生産効率の改善ペースが上がることを想定している。

このようにブロイラー種鶏は日々改良が続けられている。一方で、家禽の栄養素量における世界的な指標である全米研究評議会（The National Research Council, NRC）は 1994 年度版から更新されておらず、日本国内の指標である日本飼養標準・家禽も 2011 年度版から更新されていない。すなわち、恒常的に

進化を遂げる現代の高増体ブロイラーにとって最大限の生産能力を発揮できる飼料の指標ではなくなっている可能性がある。一方、各種鶏メーカーも継続的にマニュアルを改訂しており、各栄養素量の指標を提示している。しかしながら、それらのマニュアルでは様々な研究による成果を反映させているものの、実際には代表的なインテグレーターにおけるコマーシャル農場での実績から予測されたものやその反応から推定された指標が中心であり、必ずしも今日の、そして日本国内で飼育されているブロイラーにとって最適なものであるとはいえないものと示唆される。

3. メタボローム解析の有用性

生体内には核酸（DNA）やタンパク質のほかに、糖、有機酸、アミノ酸などの低分子が存在する。これらの物質の多くは酵素などの代謝活動によって作り出された代謝物質であり、このような低分子代謝産物をメタボライト（メタボローム）と呼んでいる。細胞や生体内の働きを理解するには各分子情報の解明が重要であるが、生命現象を包括的に俯瞰するには、DNA 配列の網羅的解析（ゲノミクス）、遺伝子発現の網羅的解析（トランスクリプトミクス）、タンパク質の構造解析や立体構造の決定などを通した網羅的解析（プロテオミクス）、SNP の同定、ならびに細胞内の全代謝物質の網羅的解析（メタボロミクス）等、個々の網羅的分子情報の基礎研究から、種々の分子情報の差異と共通性に基づいてバイアスがかからないように全体を把握することが解明の糸口となる。このような網羅的解析を一般にオミックス（omics）と呼んでいるが、網羅的なデータ解析によって背後に隠れている因子を見つけ出そうとする仮説発見型研究であり、人が予想もしていなかった大発見をもたらす可能性を秘めている（実験医学「メタボローム」参照）。このうちメタボライトを網羅的に解析することがメタボローム解析（メタボロミクス）であり、代謝物質の種類や濃度を網羅的に分析・解析する手法を指す。

ヒューマン・メタボローム・テクノロジーズ株式会社（HMT 社）によるセミナー「多変量解析を用いたメタボローム解析（2014 年 8 月 22 日）」では、Nature に掲載された Sreekumar ら（2009）のメタボロミクス論文「代謝物質の一つであるサルコシンが前立腺の悪性度に関与している」の内容として、メタボロミクスによって前立腺の腫瘍の悪性度に関連する代謝物質を同定し、分子生物学

的手法によって検証することで、腫瘍に関連するマーカーを同定することに成功した研究報告が事例として紹介された。比較的新しい学問とはいえ、以前よりメタボロミクスによる疾患のマーカー候補の検索は行われていたが、疾患との相関を調査し、検出されたマーカーが疾患と科学的に関連することを証明したことでメタボロミクスの学問的価値を高めた報告の一つといえる。メタボロミクスの強みとしては、代謝物質の種類や濃度の変動を解析するため、遺伝子レベルの変動による予測よりも、表現型への影響が直接的にリンクしやすいことが挙げられる。たとえば、温度や光など環境の変化や薬物摂取、食事などといった外部からの刺激や疾病などにより代謝が動くと、血液、尿、組織、細胞および液胞などの中に存在する代謝物質の種類や濃度に変化が起こるが、その変化を分析することにより、バイオマーカーの探索や代謝の生化学的仮説立案・検証が可能となり得るものと推察される（HMT 社 Web サイトより一部引用）。

仮にブロイラーの飼料摂取量を増減させたり、FCR を改善し得るバイオマーカーとしてのメタボライトが発見できれば、飼料の栄養組成の変化などによって、それらをコントロールできるようになる可能性がある。また、血液など非破壊的に採取可能なバイオマーカーを得ることができれば、成長時の動物の成育時の時々における状態の把握や、生産指標を改善するための栄養組成や新規素材のスクリーニングに供することが可能になるものと考えられる。動物飼養試験では「動物数」や「試験期間」が律速となる問題があるが、バイオマーカーを血液に見出すことにより、動物数においては供試数の少数化やそれに伴う試験区間数の増加、試験期間においては出荷時体重まで待たなくとも早い段階で増体重や FCR などの生産指標を推定できるようになることが期待できる。しかしながら、メタボロミクスを用いた技術はヒトの臨床試験や創薬および機能性食品の開発に多く用いられるようになってきたものの、畜産・家禽学の研究においてはまだ多くない。畜禽学においては Tomonaga ら（2018）の報告「ニワトリの血漿代謝産物のプロファイルにおける高温条件の影響」といった暑熱条件のような飼育環境に関する知見などは幾つかあるが、ブロイラーの生産指標となる増体重、飼料摂取量および FCR において、配合飼料の栄養組成を変化させた際に網羅的にメタボローム解析した例は少なく、バイオマーカーを探索したことを報告した例は殆ど見当たらないのが現状である。

4. 本研究の目的

従来、*in vivo* における適切な栄養要求量に関する動物を用いた解析手法は多くの個体を使用し、実際に給与試験を行って評価する方法を取ってきた。そのため、すでに生産現場に導入されたヒナを用いて飼養試験を行い、最適な栄養条件を検討せざるを得ない点に問題があった。前述のように、ブロイラーの育種改良のスピードは非常に速く、また、その改良のスピードは年々増しており、鶏の飼養条件および栄養条件を見出し適合させる技術が追いつかない状況となっている。したがって、ブロイラー産業界では増体性能や FCR を改善させるために、少ない飼養試験で最適な栄養要求量を素早く導き出し決定する手法の開発が望まれている。そこで本研究では、現代の高増体ブロイラーの成長にとって重要な飼料中の代謝エネルギー (Metabolic Energy, ME)、タンパク質 (蛋白質, Crude Protein, CP) およびアミノ酸 (Amino Acid, AA) のバランスに着目し、日々改良が進んでいる現代のブロイラーに見合った栄養素組成をこれまでの飼養試験を行って明らかにすると共に、その栄養素組成の妥当性を迅速に判断し、さらには決定し得る手法を開発する可能性を探る研究を進めた。

ブロイラーの増体性能や FCR を改善するためには飼料中の ME 強化が有効な手段と考えられてきたが、近年では AA の含有量やそのバランスが大きく影響を与えていることが報告されている (Kidd ら, 2004a; Petri ら, 2007; Dozier ら, 2007, 2008)。したがって、本研究では、初めに栄養素組成に対する一般的知見が現代の高増体ブロイラーの生産成績に符合するかを確認することとした。すなわち、適切な実験条件を作成するための土台を作るため、ME と CP (AA) に関する飼料給与試験を行い、その反応性について評価を行った (第 2 章)。次に、AA の理想的なバランスを探索するため、とうもろこし-大豆油かすを主体としたブロイラー用配合飼料において第一制限 AA といわれるリジンおよびメチオニンに対する反応を評価した。この評価によってリジンの重要性を見出した後、得られた知見を元にリジン強化飼料の有用性を更に改善するための手法の検討としてスレオニンならびにアルギニンの適正比率に関する評価を行った (第 3 章)、第 4 章では FCR が改善された鶏の血中低分子化合物を網羅的に評価することで、生産性と代謝の関連性を概観することができると検討した。また、ブロイラーの遺伝的能力を発揮し FCR を改善する栄養組成を迅速に判断するための指標となり得る血中マーカーの探索を行った。

本論文内における用語等の注釈

各分野において同じ意味を示すものの、用語が異なる或いは外国語を日本語に翻訳した際にカナ表記が異なるなど呼称が統一されていないものが存在する。日本国内では省庁により用語の使われ方が異なることなども用語統一されていない理由に挙げられる。そのため、栄養成分としての表記と飼料原料としての表記が異なるケース等も散見されるが、本論文では動物栄養学分野で一般的に用いられる用語に統一して使用することとし、以下の通り表現することとした。

タンパク質／蛋白質／たん白質／タンパク ⇒ タンパク質

必須アミノ酸／不可欠アミノ酸 ⇒ 必須アミノ酸

非必須アミノ酸／可欠アミノ酸 ⇒ 可欠アミノ酸

リジン／リシン ⇒ リジン

スレオニン／トレオニン ⇒ スレオニン

リン／燐／りん ⇒ リン

また、本論文内では一部の節において含硫アミノ酸（TSAA）の表記を用いているが、この際における含硫アミノ酸とはメチオニン＋シスチン（Met+Cys）を示すものとする。本来、Cys はシステインの略号であり、S-S 結合部位をもちシステイン 2 分子で構成されるシスチンの略号は Cys-Cys と表わされるが、動物栄養学（家畜飼養学,や飼料栄養学を含む）の分野においては慣例としてシスチンを Cys、システインを CysH と表現することが一般化している。そのため、本論文内においても本表記に統一することとした。

なお、各栄養素（成分）の分析では測定方法によって標準品あるいは標準物質を用いているが、特に断りがない場合において、各分析結果は記載された栄養素（成分）に換算して示すこととした。

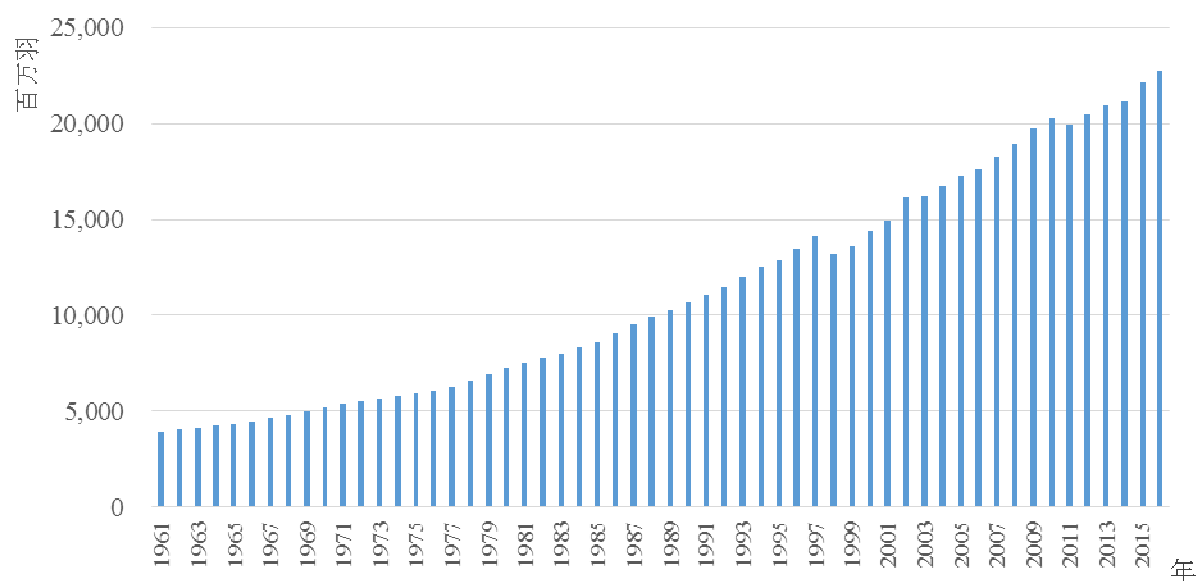


図1-1. 世界におけるブロイラーの飼養羽数の推移

Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO STATの統計データより
 URL: <http://www.fao.org/home/en>
 Accessed on Oct 27, 2018

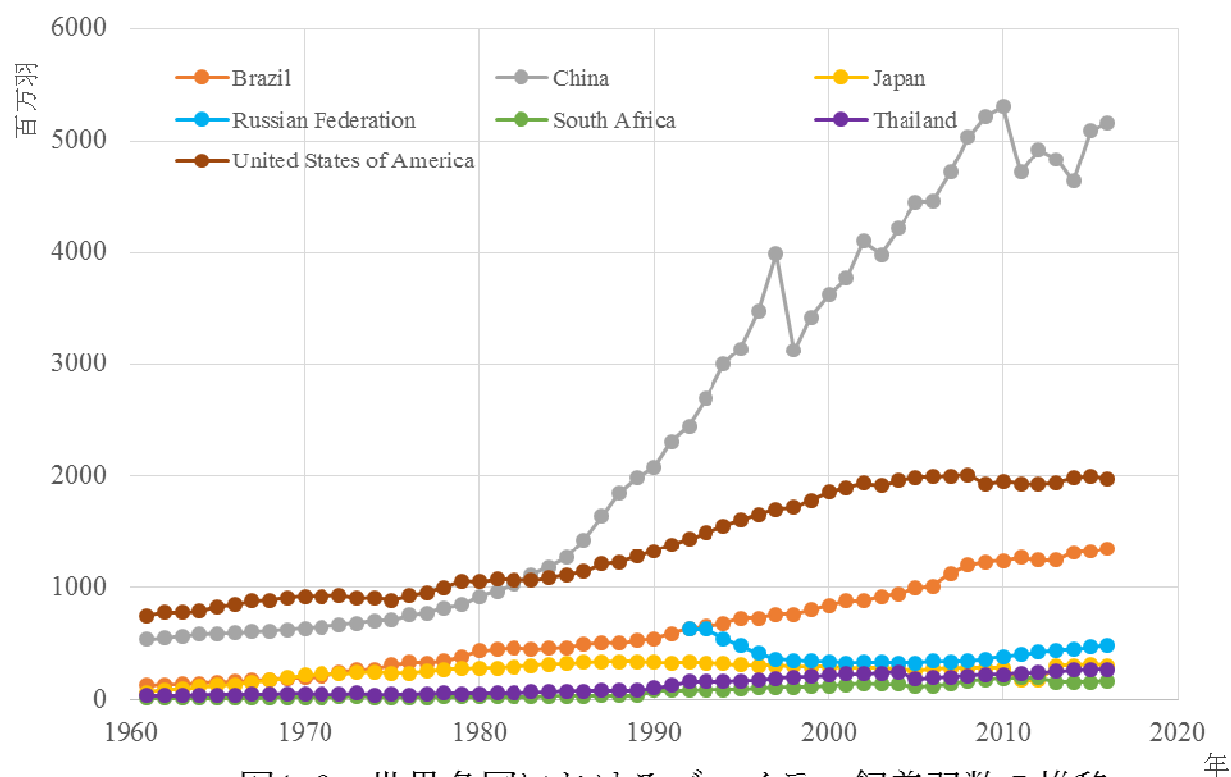


図1-2. 世界各国におけるブロイラー飼養羽数の推移

※一部推定値含む

Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO STATの統計データより

URL: <http://www.fao.org/home/en>

Accessed on Oct 27, 2018

第 2 章

高増体ブロイラーの肥育後期における配合飼料中の
代謝エネルギー(ME)、粗タンパク質(CP)
および理想的タンパク質としての必須アミノ酸(AA)
の含量が
増体重および飼料要求率(FCR)に及ぼす影響

第 1 節

ME および CP の強化が増体重および FCR に及ぼす影響

1. 緒言

近年、ブロイラーにおいては飼料要求率（FCR）を重視した生産が為されるようになっている。従来、FCR 改善の有効な手段としては配合飼料中の ME を高めることが効果的であるとされてきた。これは、一般に鳥類が低エネルギーの食餌に適応し、エネルギー摂取量を維持するために、より多くの飼料を摂食することができると考えられているからである（Payne, 1967）。つまり、鶏はエネルギー摂取量のある範囲内で調整する能力を有しており、低エネルギー飼料を与えると飼料摂取量を増やすことによって一定量のエネルギーを摂取するように調整し、反対に高エネルギー飼料を与えると飼料摂取量を自ら低下させる。この反応を利用し、飼料中の ME を高めることで飼料摂取量を減少させ、かつ体重を維持できれば FCR の改善に繋がるとされてきた。しかしながら、ME への反応について少し異なる報告も出てきている。近年の試験例として、Dozier ら（2011）は飼料中の ME 含量を 3,140kcal/kg から 3,240kcal/kg まで 20kcal/kg 刻みで増加させた飼料の給与試験の結果を報告している。本報告では、飼料中の ME 含量に対する反応について、メスでは認められず、オスでは FCR および体重当たりの摂取エネルギーの結果を踏まえると、3,200kcal/kg でプラトーに達していた。したがって、エネルギー効率（AME/増体重）は一定水準で頭打ちとなる可能性を示唆している。

一方、近年のブロイラーは、CP あるいはアミノ酸レベルによく反応し、特にアミノ酸を強化することにより FCR が改善するとの報告が散見される（Wijtten ら, 2003; Richards ら, 2004; Petri ら, 2007）。その一例として、Petri ら（2007）は、飼料中のアミノ酸含量を高めるに伴い、飼料摂取量が減る一方で体重が増加する傾向にあることを報告している。タンパク質やアミノ酸は体を構成する上で重要な栄養素であるものの、体タンパク質は体内において合成と分解が絶えず繰り返されている。すなわち、配合飼料中に不足すれば成長の抑制要因になる可能性があり、過剰に含まれれば体タンパク質として蓄積できないばかり

でなく、排泄にかかるエネルギーの損失になる可能性もあるため、適量含まなければならない。しかしながら先述の Petri らの報告によると、現代の高増体ブロイラーに対し、NRC 推奨レベルの基準飼料の CP あるいはアミノ酸が不足している可能性を示唆している。

そこで本節では、肥育後期における現代のブロイラーにおいて、従来の FCR 改善手法として有効とされてきた飼料中の ME 含量の強化と CP あるいはアミノ酸含量の強化が FCR に及ぼす影響について検討した。

2. 材料および方法

(1) 試験飼料の作製

配合飼料の設計においては、日本農産工業株式会社の線形計画法（Linear Programming, LP）に基づいた「飼料システム」を用いて LP 計算し、得られた解を元に配合飼料を製造して試験に供試した。なお、ここで示した「飼料システム」とは配合飼料に用いられる原料について、予め各栄養素量と価格単価を設定し、指定した各栄養素組成に対して要求量を満たし、かつ一番コストメリットが高くなるように原料を使用するようプログラムを組んだ線形計画システムのことである。LP 計算による配合飼料設計は現代において一般化されている技術であり、国や配合飼料メーカーによってもプログラムの組み方が若干異なるものの、基本的に考え方は同じである。本論文内で供試した試験飼料は、原料を置換することによって補正した一部の飼料を除き、原則として本システムを用いて栄養設計および配合率の作成を行った。本配合設計内容に基づき、飼料を製造して試験に供試した。

(2) 供試鶏

ROSS308（英国(UK)産チャンキー）のオスの初生ヒナを株式会社森孵卵場より 500 羽購入し、日本農産工業株式会社畜産技術センターのウインドウレス鶏舎（ペン室）にて、CP22.2%、ME3,100kcal/kg のマッシュ飼料を用いて 21 日齢まで馴致した。21 日齢にて体重の近い個体 300 羽を選抜し（平均体重約 900g）、5 つの試験区に対し各々 15 羽ずつ 4 反復となるように区分けを実施した。舎内温度等の環境条件については ROSS308 Management Handbook (Aviagen) に準じて調整を図った。

(3) 試験区

対照飼料（AA100-ME3200 区）に対し、有効アミノ酸を 10% および 20% 強化した飼料の給与区（AA110-ME3200 区および AA120-ME3200 区）、ならびに ME を 50kcal/kg および 100kcal/kg 強化した飼料の給与区（AA100-ME3250 区および AA100-ME3300 区）を設けた。

各栄養素要求量の推奨値は表 2-1-1 に示した必須アミノ酸の要求量など、様々な指標があるが、本試験では供試鶏をチャンキーとしたことから、基準とする対照飼料の栄養成分は、表 2-1-2 に示したチャンキーマニュアル 2009 年度版のフィニッシャー 2 の推奨値に準じた。すなわち、有効アミノ酸の設計は同マニュアルで推奨された値を 100% とし、ME は 3,200kcal/kg とした。また、各試験区の CP の設計値は 18.2% 以上になるように設定した。本節の各試験区において給与した配合飼料の組成は表 2-1-3 に、当該飼料の各栄養成分の分析値を表 2-1-4 に示した。なお、各試験区の内容を整理すると以下の通りとなる。

AA100-ME3200 区：対照飼料*（有効アミノ酸 100%・CP18.2%・ME3,200kcal/kg）

AA110-ME3200 区：有効アミノ酸 110%・CP18.3%・ME3,200kcal/kg 飼料

AA120-ME3200 区：有効アミノ酸 120%・CP19.6%・ME3,200kcal/kg 飼料

AA100-ME3250 区：有効アミノ酸 100%・CP18.2%・ME3,250kcal/kg 飼料

AA100-ME3300 区：有効アミノ酸 100%・CP18.2%・ME3,300kcal/kg 飼料

*チャンキーマニュアル 2009 年度版のフィニッシャー 2 で推奨された有効アミノ酸レベルとした飼料を対照飼料（区）とした

(4) 測定項目および統計処理

21, 28, 35 および 42 日齢の体重を測定した。また、体重測定日間ごとに飼料摂取量を計測した。これらの計測値を元に各日齢間の増体重および飼料要求率を求めた。また試験終了時の 42 日齢において、各区 6 羽ずつ平均体重が概ね揃う鶏を選抜し、歩留りを計測する目的で放血屠殺した。さらに 60℃ の湯に約 1 分間浸漬した後、脱毛機を用いて脱毛処理し 2 時間以上氷冷した。その後解体処理を行い、鶏肉部位として右側のモモ肉およびムネ肉を、内臓脂肪として腹腔内脂肪を採取し重量を測定した。各部位の重量を処理時の体重で除し、歩留まりを求めた。なお、ムネ肉は皮を取り除いた浅胸筋を示し、深胸肉は含まな

い。モモ肉は同様に皮を取り除いた後、さらに大腿骨および脛骨を脱骨した大腿筋とした。また、腹腔内脂肪は筋胃の周囲に付着した脂肪を中心に除去し、十二指腸から空回結腸周囲の脂肪は取り除ける範囲で採取した。歩留まり測定に供しない鶏はすべて食鳥処理業者である株式会社染谷食鳥（茨城県）に適切に出荷した。得られたデータは、統計ソフト R version 2.13.0 (Windows 版) を用い、Tukey の多重比較検定を行った。

3. 結果

試験開始後の各週齢における体重ならびに週齢間の増体重、飼料摂取量および FCR を表 2-1-5 に示した。

試験終了の 42 日齢時生体重および試験期間中（21～42 日齢）における増体重は、各試験区間で有意差は認められなかったが、AA120-ME3200 区は、対照区および他の試験区に対して優れる傾向にあった。一方、試験期間中の飼料摂取量（食下量）についても有意差は認められなかったが、対照区に対し、アミノ酸を強化した AA110-ME3200 区および AA120-ME3200 区で減少する傾向にあり、反対に ME を強化した AA100-ME3250 区および AA120-ME3300 区で若干増加する傾向にあった。

試験終了時の歩留まりは、大腿筋、浅胸筋および腹腔内脂肪について、各区間における有意差は認められず、アミノ酸もしくは ME 強化による優位性は見られなかった（表 2-1-6）。

4. 考察

本節では現在の肥育後期のブロイラーが飼料中の ME とアミノ酸のどちらに対して反応が強いかを概観するために各々の水準を高めた飼料の給与試験を行った。その結果、アミノ酸含量の増強により、食下量が低減する傾向が見られ、反対に試験終了時体重は増加傾向にあった。Petri ら（2007）は、飼料中のアミノ酸レベルを高めるに伴い、食下量が減る一方で体重が増加する傾向にあることを報告しており、本試験結果と合致した。一方、本試験では ME の強化に伴い、食下量は増加傾向にあり、体重増加への影響はアミノ酸強化と比較して小さいものであった。従来、ブロイラーの飼料摂取量の制限因子は ME とされて

おり、エネルギー要求量を満たすよう食下量を調整するとされている。Leesonら（1996）の報告でも ME を 3,300kcal/kg から 2,700kcal/kg まで引き下げると飼料摂取量は増加するが、全体的な成長率に対する影響は小さく最終体重は変わらなかったとしており、先述の Petri らのグループも同様の報告をしている。しかしながら、本試験においては対照区（AA100-ME3200 区）と AA100-ME3300 区間の ME 差が約 3% あったにもかかわらず、ME を強化した AA100-ME3300 区の方が逆に食下量は増加する傾向が見られており、必ずしも現在のブロイラーの摂食性が ME に反応して変化していない可能性が示唆された。Richards(2003) は育種改良が進み、形質選抜がされていくなかで鶏の脳の働きが変わり、食下量の制限因子が変化しているとの報告をしている。本試験での従来の ME への反応と異なる結果は、現代の高増体ブロイラーの栄養に対する反応が変化している可能性を示唆するものであると推察される。

本試験における増体重については、21～35 日齢の試験開始後 2 週間で有効アミノ酸を強化するに伴って改善する傾向があったが、ME を強化しても対照区と差がない結果が得られた。このことから、有効アミノ酸の強化は増体重の改善に寄与する可能性が示唆された。しかしながら、35～42 日齢においては、ME を強化した AA100-ME3300 区の増体重が大きくなる傾向があったことから、35 日齢体重である 2,500g 前後からは、ME の要求量が増加する可能性もある。すなわち、成長にとって最適な ME レベルは従来通り、日齢もしくは体重によっても検討する必要があるものと考えられる。

これらの飼料摂取量および増体重の変化を受け、FCR は飼料中の有効アミノ酸を強化するに伴い改善し、特に最も有効アミノ酸を高くした AA120-ME3200 区の FCR は、対照区および他の試験区に対して有意に改善した（ $P < 0.05$ ）。反対に、従来 FCR 改善のために有効であると考えられていた ME 強化では、飼料摂取量が増加しており、FCR の改善傾向は見られなかった。したがって、肥育後期における FCR の改善には、少なくとも本節の試験で設定した栄養設計内では飼料中の ME 含量の強化よりもアミノ酸を強化する方が有効であるものと考えられた。

なお、鶏肉および腹腔内脂肪の歩留まりについては各試験区で差が見られず有効アミノ酸および ME に対する反応の規則性も見られなかった。高 ME 設計の飼料では油脂の添加量が増えるため飼料中の粗脂肪含量が増加する傾向にあるが、極端な腹腔内脂肪の増加が見られなかったことから高 ME 飼料の問題で

ある代謝障害のリスクは ME3,300kcal/kg 程度であれば許容され、現代のブロイラーにおいてはエネルギー含量として高過ぎることはない可能性が示唆される。

本節の試験では、AA120-ME3200 区は対照区および他の試験区に対し、有効アミノ酸設計値を高くした結果、CP の計算値も高くなる傾向があった。Pesti ら (2009) は、飼料中の窒素源として、非必須アミノ酸 (可欠アミノ酸)・必須アミノ酸 (不可欠アミノ酸) を問わず単に CP として供給するか、必須アミノ酸をバランスよく供給するかで生産成績は変わると報告している。しかしながら、本節で得られた FCR 改善の知見は、飼料中の CP 増加によるものなのか、有効アミノ酸として必須アミノ酸を供給したことによるものなのか検証できていない。したがって、次節では有効アミノ酸のバランスを考慮するか、あるいはしないかで FCR に及ぼす影響が異なるか否かについて検討した。

表 2-1-1. 各栄養指標において推奨される CP 値および有効アミノ酸値（％）

指標*	日本飼養標準	NRC	ROSS308	ROSS308	COBB500
発行年	2011 年	1994 年	2007 年	2014 年	2015 年
週齢	3 週齢～	6-8 週齢	43 日齢 -	40 日齢 -	43 日齢 -
CP	16.0	18.0	17-21	18.3	17-18
有効リジン	0.80	0.85	0.89	0.96	0.90
有効メチオニン	0.33	0.32	0.35	0.40	0.37
有効メチオニン+シスチン	-	0.60	0.69	0.75	0.70
有効スレオニン	0.55	0.68	0.60	0.64	0.61
有効アルギニン	-	1.00	0.93	1.03	0.97
有効バリン	-	0.70	0.69	0.73	0.69
有効イソロイシン	-	0.62	0.61	0.66	0.61
有効トリプトファン	-	0.16	0.14	0.15	0.16
有効ロイシン	-	0.93	-	1.06	-

* 各指標については以下より抜粋して引用した

日本飼養標準：日本飼養標準 家禽 2011 年度版 中央畜産会

NRC：Nutrient requirements of poultry 9th revised edition 1994 National academy press

ROSS308 2007：ROSS308 Nutrition specifications 2007 Aviagen

ROSS308 2014：ROSS308 Nutrition specifications 2014 Aviagen

COBB500: Cobb500 Broiler performance & nutrition supplement Cobb-Vantress.com

注）日本飼養標準は総アミノ酸値の記載が別途あるが有効値の記載は上表のみ

※鶏卵肉情報 2017 年 1 月 25 日号. P32-34 ブロイラー飼料を考える ③石井俊行 著（鶏卵肉情報センター）より引用（一部改変）

表 2-1-2. チャンキーマニュアル 2009 年度版 各栄養成分指標掲載値*

		スターター		グロワー		フィニッシャー1		フィニッシャー2	
給与日齢	日齢	0-10		11-24		25-42		43-アウト	
エネルギー (ME)	Kcal/kg	3025		3150		3200		3225	
アミノ酸	単位	総量	有効値	総量	有効値	総量	有効値	総量	有効値
リジン	%	1.43	1.27	1.24	1.10	1.06	0.94	1.00	0.89
メチオニン	%	0.51	0.47	0.45	0.42	0.40	0.37	0.38	0.35
メチオニン+シスチン	%	1.07	0.94	0.95	0.84	0.83	0.73	0.79	0.69
アルギニン	%	1.45	1.31	1.27	1.14	1.10	0.99	1.04	0.93
イソロイシン	%	0.97	0.85	0.85	0.75	0.74	0.65	0.70	0.61
スレオニン	%	0.94	0.83	0.83	0.73	0.72	0.63	0.68	0.60
バリン	%	1.09	0.95	0.96	0.84	0.83	0.72	0.79	0.69
トリプトファン	%	0.24	0.20	0.20	0.18	0.17	0.15	0.17	0.14
粗タンパク質 (CP)	%	22-25		21-23		19-23		17-21	
ミネラル									
カルシウム	%	1.05		0.90		0.85		0.80	
有効リン	%	0.50		0.45		0.42		0.40	
マグネシウム	%	0.05-0.50		0.05-0.50		0.05-0.50		0.05-0.50	
ナトリウム	%	0.16-0.23		0.16-0.23		0.16-0.23		0.16-0.23	
塩化物	%	0.16-0.23		0.16-0.23		0.16-0.23		0.16-0.23	
カリウム	%	0.40-1.00		0.40-0.90		0.40-0.90		0.40-0.90	
添加微量ミネラル									
亜鉛	mg/kg	100		100		100		100	
マンガン	mg/kg	120		120		120		120	
銅	mg/kg	16		16		16		16	
鉄	mg/kg	40		40		40		40	
ヨウ素	mg/kg	1.25		1.25		1.25		1.25	
セレン	mg/kg	0.30		0.30		0.30		0.30	
添加ビタミン									
(主体とする穀類)		小麦	とうもろこし	小麦	とうもろこし	小麦	とうもろこし	小麦	とうもろこし
ビタミンA	IU/kg	12000	11000	10000	9000	10000	9000	10000	9000
ビタミンD3	IU/kg	5000	5000	5000	5000	4000	4000	4000	4000
ビタミンE	IU/kg	75	75	50	50	50	50	50	50
ビタミンK	mg/kg	3	3	3	3	2	2	2	2
チアミン(B1)	mg/kg	3	3	2	2	2	2	2	2
リボフラビン(B2)	mg/kg	8	8	6	6	5	5	5	5
ニコチン酸	mg/kg	55	60	55	60	35	40	35	40
パントテン酸	mg/kg	13	15	13	15	13	15	13	15
ピリドキシン(B6)	mg/kg	5	4	4	3	3	2	3	2
ビオチン	mg/kg	0.20	0.15	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
葉酸	mg/kg	2.00	2.00	1.75	1.75	1.50	1.50	1.50	1.50
ビタミンB12	mg/kg	0.016	0.016	0.016	0.016	0.010	0.010	0.010	0.010
飼料中最低量必要な栄養素成分									
コリン	mg/kg	1600		1500		1400		1300	
リノール酸	%	1.25		1.20		1.60		1.00	

* チャンキー ブロイラー 管理マニュアル2009年度版, P101「付録5. 出荷体重3.0kg以上 無鑑別飼育用飼料成分」より引用改変
フィニッシャー1のアルギニン(有効値)は修正が入り、0.96%⇒0.99%を適用した

添加微量ミネラルならびに添加ビタミンは原料由来のミネラル以外に添加する量を記載した

本マニュアル(チャンキーマニュアル, CHM)は、Aviagen社による“ROSS308 BROILER Nutrition Specification (June 2007)”を
日本チャンキー協会が日本国内向けに2009年度版として日本語版に翻訳したものである(一部修正含む)

表 2-1-3. 各試験飼料の組成および計算値

試験飼料* ¹ AA(%)-ME(kcal/kg)	AA100- ME3200 区	AA110- ME3200 区	AA120- ME3200 区	AA100- ME3250 区	AA100- ME3300 区
とうもろこし・中	54.51	54.52	54.52	54.51	54.52
マイロ・中	7.91	7.69	5.20	8.09	8.95
大豆油かす (HP)	16.53	16.50	20.03	17.63	20.72
なたね油かす	10.00	10.00	9.30	8.55	4.36
魚粉 (65%)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Y.G. (27 度)	5.50	5.50	5.50	6.00	6.20
L-リジン (98.5%)	0.040	0.150	0.160	0.030	-
DL-メチオニン (99%)	0.140	0.210	0.250	0.140	0.160
L-スレオニン (98.5%)	-	0.030	0.040	-	-
炭酸カルシウム (粉)	1.460	1.490	1.110	1.130	1.130
リン酸カルシウム(トリカホス)	0.550	0.550	0.530	0.560	0.610
食塩	0.160	0.160	0.160	0.160	0.150
フィターゼ* ¹	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
ビタミン・ミネラルミックス* ²	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
粗タンパク質 (%)	18.2	18.3	19.6	18.2	18.2
粗脂肪 (%)	8.00	8.00	8.00	8.50	8.60
粗繊維 (%)	2.60	2.60	2.60	2.50	2.20
粗灰分 (%)	5.30	5.40	5.10	5.00	5.00
ME(kcal/kg)	3,200	3,200	3,200	3,250	3,300
カルシウム (%)	1.03	1.04	0.90	0.90	0.90
総リン (%)	0.58	0.57	0.58	0.57	0.55
有効リン (%)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
有効リジン (%)	0.89	0.98	1.07	0.89	0.89
有効メチオニン (%)	0.42	0.49	0.55	0.42	0.43
有効メチオニン+シスチン (%)	0.69	0.76	0.83	0.69	0.69
有効スレオニン (%)	0.64	0.66	0.72	0.64	0.64
有効アルギニン (%)	1.02	1.02	1.12	1.03	1.06

*1 試験飼料は対照飼料を有効アミノ酸 100%、ME3,200kcal/kg として設計した。なお、各区における AA は有効アミノ酸を示し数字は強化割合 (%)を示す。

*2 ロノザイム NP(CT) 1500FYT/kg

*3 ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; メナジオン 2.9mg/kg; ビタミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン 0.13mg; ピリドキシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨウ素 1.3mg

表 2-1-4. 各試験飼料の分析値

試験飼料 AA(%)-ME(kcal/kg)	AA100- ME3200 区	AA110- ME3200 区	AA120- ME3200 区	AA100- ME3250 区	AA100- ME3300 区
粗タンパク質(%)	20.74	20.37	20.54	19.31	19.67
粗脂肪(%)	7.10	6.81	8.24	8.62	8.34
粗繊維(%)	2.05	2.33	2.08	2.16	2.29
粗灰分(%)	4.77	4.67	4.70	4.51	4.52
水分(%)	11.60	11.73	11.53	11.65	11.58
カルシウム(%)	0.83	0.82	0.82	0.79	0.79
総リン(%)	0.57	0.57	0.55	0.54	0.55
総リシ ^ン (%)	1.16	1.31	1.25	1.18	1.07
総メチオ ^ン (%)	0.48	0.58	0.61	0.53	0.49
総シスチ ^ン * (%)	0.37	0.36	0.34	0.34	0.34
総スレオ ^ニ (%)	0.82	0.91	0.86	0.79	0.78
総アルキ ^ニ (%)	1.26	1.29	1.26	1.15	1.18

すべての成分値は公定法にて分析した。

*総シスチ^ン: LC/MS を用いて分析を行い、システイン酸の分析値から 1/2 システインとしてシスチン含量に換算した。

表2-1-5. 有効アミノ酸水準もしくはME水準を強化した飼料をROSS308系ブロイラーに給与したときの各生産成績指標に及ぼす影響*1

試験区*2											
		AA100-ME3200区		AA110-ME3200区		AA120-ME3200区		AA100-ME3250区		AA100-ME3300区	
生体重, g/羽											
21日齢		897	± 49	912	± 57	898	± 45	900	± 47	898	± 46
28日齢		1657	± 66	1676	± 77	1697	± 71	1671	± 72	1667	± 72
35日齢		2476	± 88	2503	± 102	2550	± 80	2483	± 94	2488	± 93
42日齢		3118	± 77	3130	± 99	3195	± 92	3130	± 100	3156	± 129
増体重, g/羽											
21～28日齢		759	± 19	763	± 36	798	± 27	772	± 26	770	± 33
28～35日齢		819	± 24	828	± 25	853	± 19	811	± 23	820	± 25
35～42日齢		642	± 23	627	± 10	645	± 13	648	± 16	668	± 58
試験期間(19～42日齢)		2220	± 29	2218	± 58	2297	± 49	2231	± 54	2258	± 97
飼料摂取量, g/羽											
21～28日齢		1128	± 45	1132	± 52	1118	± 34	1127	± 40	1127	± 36
28～35日齢		1389	± 38	1378	± 53	1361	± 44	1391	± 40	1417	± 31
35～42日齢		1435	± 17	1412	± 30	1415	± 37	1429	± 32	1472	± 43
試験期間(19～42日齢)		3952	± 94	3922	± 129	3893	± 101	3948	± 109	4020	± 92
飼料要求率(FCR)											
21～28日齢		1.484	± 0.026	1.484	± 0.053	1.400	± 0.014	1.461	± 0.010	1.465	± 0.037
28～35日齢		1.696	± 0.019	1.664	± 0.016	1.594	± 0.022	1.715	± 0.007	1.728	± 0.020
35～42日齢		2.239	± 0.074	2.251	± 0.049	2.193	± 0.028	2.207	± 0.061	2.211	± 0.134
試験期間(19～42日齢)		1.780	± 0.020	1.768	± 0.026	1.695	± 0.013	1.770	± 0.020	1.781	± 0.036

a-c 異なる肩文字をもつもの同士の間に有意差あり(P < 0.05)

*1 生産成績は各日齢における生体重ならびに、各日齢間における増体重、飼料摂取量およびFCRとした

*2 チャンピオンマニュアル2009年度版の栄養成分表のフイニッシュャー2に記載された有効アミノ酸(AA)をAA水準の基準(AA100%)とし、MEは3,200kcal/kgを基準とした。すなわち、当該飼料(AA100-ME3200)を給与した区を対照区とした。さらに対照区に対して、AA+10%強化飼料の給与区をAA110-ME3200区、AA+20%強化飼料の給与区をAA120-ME3200区、ME+50kcal/kgの強化飼料給与区をAA100-ME3250区およびME+100kcal/kg強化飼料区をAA100-ME3300区とした

表2-1-6. 試験終了時における鶏肉・脂肪歩留まり^{*1}において有効アミノ酸強化あるいはME強化飼料^{*2}が及ぼす影響

試験区	AA100-ME3200区		AA110-ME3200区		AA120-ME3200区		AA100-ME3250区		AA100-ME3300区	
処理前生体重 ^{*3} (g羽)	3170 ±	86	3275 ±	86	3270 ±	160	3188 ±	196	3308 ±	134
組織重量	(g)									
大腿筋	261.7 ±	11.7 ^a	257.0 ±	14.5 ^{ab}	271.9 ±	21.4 ^{ab}	264.4 ±	14.4 ^{ab}	269.7 ±	28.8 ^b
浅胸筋	269.7 ±	17.3 ^a	295.0 ±	16.0 ^{ab}	293.1 ±	31.2 ^{ab}	263.5 ±	21.7 ^b	270.1 ±	24.6 ^{ab}
腹腔内脂肪	59.6 ±	14.1	51.4 ±	12.8	58.9 ±	13.2	62.1 ±	15.0	65.2 ±	10.1
歩留まり	(%)									
大腿筋	8.3 ±	0.4 ^a	7.8 ±	0.4 ^a	8.3 ±	0.4 ^{ab}	8.3 ±	0.3 ^{ab}	8.1 ±	0.6 ^b
浅胸筋	8.5 ±	0.5	9.0 ±	0.5	8.9 ±	0.6	8.3 ±	0.5	8.2 ±	0.5
腹腔内脂肪	1.9 ±	0.4	1.6 ±	0.4	1.8 ±	0.4	1.9 ±	0.4	2.0 ±	0.3
平均値±標準偏差, n = 6										

^{a,b,c} 異なる肩文字を持つもの同士の間で有意差あり (P < 0.05)

^{*1} 鶏肉はモモ肉として大腿筋、ムネ肉として浅胸筋とし右側のみ採取。脂肪は腹腔内脂肪とした

^{*2} チヤンキーマニユアル2009年度版の栄養成分表のフイニツヤーマニ2に記載された有効アミノ酸(AA)水準を基準(100%)とし、MEは3,200kcal/kgを基準とした飼料を対照飼料とした。当該飼料を給与した区を対照区(AA100-ME3200区)とし、さらに対照飼料に対し、AA+10%強化した飼料の給与区をAA110-ME3200区、AA+20%強化飼料給与区をAA120-ME3200、ME+50kcal/kg強化飼料給与区をAA100-ME3250区およびME+100kcal/kg強化飼料給与区をAA100-ME3300区とした

^{*3} 歩留まり測定に供試した個体の重量を示した

第 2 節

有効アミノ酸の強化が増体重および FCR に及ぼす影響

1. 緒言

配合飼料の栄養設計を行う上で必要な成分の一つであるタンパク質は、一般に粗タンパク質（Crude Protein, CP）としてその含量が表わされる。CP は各原料に含まれる窒素（N）の量を測定し、そこへ窒素換算係数である 6.25 を掛けることで算出される。これはタンパク質には平均して窒素が 16% 含まれているため、測定が比較的容易であることから、配合飼料の品質を表わす上でも管理がしやすく、タンパク質量を示す指標として一般的に用いられている。配合飼料に含まれる窒素源にはこの「タンパク質」のほかに、アンモニアやアミン類などの「非タンパク態窒素」も含まれる。つまり、CP とは「タンパク質」と「非タンパク態窒素」の合計を示すものといえる。

しかしながら、家畜・家禽の生産性は、タンパク質を構成するアミノ酸含量やバランスによっても影響を受けることが過去から指摘されており、必要なタンパク質量の指標について CP だけでは不十分であることが推察される。高増体ブロイラーにおいて、至適なバランスのアミノ酸を伴ったバランスタンパク質（Balance Protein, BP）※の水準を高めることが増体重や FCR の改善において重要であることは Pesti ら（2009）の報告によっても裏付けられている。また、第 1 節における試験において、対照区（各アミノ酸についてチャンキーマニュアルを満たすように設計）に対して有効アミノ酸を 120% 強化した飼料で FCR は改善したが、対照区の CP18.2% に対して CP18.3% であった試験区 1（有効アミノ酸 10% 強化）でも有意ではないものの FCR1.780 に対し 1.768 と若干の改善傾向が見られた。したがって、同 CP 条件下でもアミノ酸の組成やその量の違いによって鶏の食下量や増体重に関する反応が異なる可能性が示唆される。

そこで本節では、肥育後期のブロイラーの増体重および FCR において、窒素源としての質が及ぼす影響の重要性を評価するため、アミノ酸の組成を考慮しない「とうもろこし-大豆油かす主体」とした高 CP 飼料（CP 強化飼料）と必須

アミノ酸含量を中心としたアミノ酸組成が考慮された高 CP 飼料 (BP 強化飼料) が与える影響について検討した。

※ バランスタンパク質 (Balance Protein, BP) ;

配合飼料の栄養設計においては、一定のバランスで必須アミノ酸 (不可欠アミノ酸) を設計する「最適アミノ酸設計 (理想タンパク質)」の概念があり、NRC や各鶏種会社独自のマニュアルなどが存在している (図 2-1-1)。本論文においては、この最適アミノ酸設計に基づくアミノ酸のバランスを踏まえた粗タンパク質 (Crude Protein, CP) を“バランスタンパク質 (BP)”と定義することとした。なお、本用語は日本国内の生産現場においては一般化されたものである。また、本節においては、有効アミノ酸設計を表 2-1-2 に示したチャンキーマニュアル (Chunky Manual, CHM) 2009 年度版のフィニッシャー 2 推奨値に合わせたため、このアミノ酸のバランスをした組成を“バランスアミノ酸”と表現することとした。

2. 材料および方法

(1) 供試鶏

ROSS308 (UK 産チャンキー) のオスの初生ヒナを株式会社森孵卵場より 450 羽購入し、日本農産工業株式会社畜産技術センターのウインドウレス鶏舎 (ペン室) にて、CP20.2%、ME3,100kcal/kg のマッシュ飼料を用いて 19 日齢まで馴致した。19 日齢にて体重の近い個体 80 羽を選抜し (平均体重約 830g)、2 つの試験区に対し各々 10 羽ずつ 4 反復となるように区分けを実施した。なお、供試した個体以外の鶏ヒナは別の試験に供試した。舎内温度等の環境条件については ROSS308 Management Handbook (Aviagen) に準じて調整を図った。

(2) 試験区

本試験では CP を強化した飼料および BP を強化した飼料の 2 種類の配合飼料を作製し、各々 CP 強化区および BP 強化区とした。CP 強化飼料および BP 強化飼料の ME 設計値は共に 3,200kcal/kg とした。また、飼料中の有効アミノ酸水準は、BP 強化区について、チャンキーマニュアル 2009 年度版 (CHM2009) のフィニッシャー 2 (バランスアミノ酸 100%, BP100%) の 20% 増し (バランス

アミノ酸 120%、BP120%）とした。このときの CP 計算値は 19.4%であったことから、CP 強化区は CHM2009 の BP100%を満たした上で BP 強化区の CP 計算値と同等になるように第 1 節 2(1)で示した飼料システム（日本農産工業(株)、神奈川県神奈川県横浜市）を用いて LP 計算して配合設計を行い、試験飼料を製作した。2 つの試験区の内容を整理すると以下の通り。詳細な配合設計内容は表 2-2-1、各栄養成分の分析値は表 2-2-2 に示した。

CP 強化区：バランスアミノ酸 100%※¹・CP19.4%・ME3,200kcal/kg 飼料

BP 強化区：バランスアミノ酸 120%・CP19.4%・ME3,200kcal/kg 飼料※²

※¹ CP 設計値は大豆油かす等の原料で調整しており、一部の必須アミノ酸についてバランスアミノ酸 100%よりも若干高まる傾向あり（表 2-2-1）。

(3) 測定項目および統計処理

19, 30, 35 および 42 日齢において全個体の体重と、各試験区で反復ごとに飼料の残餌量を計測し、羽当たりの飼料摂取量を割り出した。また、それらの測定値を用い、各反復における羽当たりの増体重および飼料要求率を算出した。鶏肉・脂肪歩留まり（大腿筋、浅胸筋および腹腔内脂肪）については第 1 節で示した方法と同様に測定した。また、本試験においても、歩留まり測定に供しない鶏はすべて食鳥処理業者である株式会社染谷食鳥（茨城県）に適切に出荷した。得られたデータは、統計ソフト R version 2.13.0 (Windows 版)を用いて、t 検定による平均値の比較を行った。

3. 結果

試験開始後の各週齢における体重ならびに週齢間の増体重、飼料摂取量および FCR を表 2-2-3 に示した。試験終了 42 日齢時の生体重は、各試験区 40 羽の平均値で、CP 強化区 3,305g に対して BP 強化区 3,423g と、CP 強化区に対し BP 強化区の方が 3.6%大きい傾向が見られたが有意差は認められなかった（ $P > 0.05$ ）。また、試験期間（19～42 日齢）における増体重についても有意差は認められなかったものの、CP 強化区（2,475g）に対し BP 強化区（2,593g）で約 5%優れる傾向が見られた。なお、肥育後期ステージを 2 段階に分けて評価した場合、19～30 日齢（後期）では CP 強化区 1,205g 対 BP 強化区 1,270g（+4.1%）、

30～42 日 齡（仕上期）では CP 強化区 1,254g 対 BP 強化区 1,339g（+5.5%）と後期および仕上期共に BP 強化区で優れる傾向が見られた。一方、19～42 日 齡における飼料摂取量は各区でほぼ同等となり有意差は認められなかった。この結果、試験期間における FCR は CP 強化区（1.747）に対し、BP 強化区（1.662）において有意に改善した（ $P < 0.05$ ）。なお、後期および仕上期の FCR においても同様に BP 強化区で有意に改善した（ $P < 0.01$ ）。

鶏肉および腹腔内脂肪の歩留りについて図 2-2-1 に示した。モモ肉として大腿筋およびムネ肉として浅胸筋の生体重に対する歩留りにおいて、2 区間で有意差は認められなかったが BP 強化区では若干増加する傾向が見られた。一方、腹腔内脂肪の歩留りは CP 強化区に対し、BP 強化区で減少する傾向が見られた（ $P = 0.052$ ）。

4. 考 察

本節の試験目的は、肥育後期のブロイラーの増体重および FCR において、窒素源としての質が及ぼす影響の重要性を評価することにあった。また、NRC1994 年版や日本飼養標準・家禽 2011 年版ではブロイラーの肥育期において、3 週 齡を境に前期と後期に大きく分けられているが、各種鶏メーカーのマニュアルではさらに細分化して必要な栄養成分の指標を作成しており肥育後期も出荷体重に応じて 2～3 段階で推奨している。そこで、本試験でも肥育後期ステージについて再分化し、19～30 日 齡を後期とし、30～42 日 齡を仕上期として定義し鶏の反応を評価した。その結果、後期において飼料中のバランスアミノ酸を 120% に高めると、飼料摂取量は変わらないが増体重が若干増加することで FCR が有意に改善した。この傾向は仕上期においても同様であったことから、現代のブロイラーにとって窒素源の内容を考慮しない CP 強化飼料よりも、バランスアミノ酸を伴う BP の方が FCR を改善するために優れており、また、肥育後期のどの時期であっても重要であることが示唆された。この結果は、第 1 節における試験結果および Pesti ら（2009）の報告を支持する結果であり、飼料中のアミノ酸組成の重要性が高いことを示している。また、鶏肉および腹腔内脂肪の歩留りからは産肉性が増加傾向にある一方で、腹腔内脂肪は減少傾向にあった。腹腔内脂肪の低減はブロイラー生産における問題の一つである代謝障害の発生抑制にも繋がるものと考えられ、バランスアミノ酸を考慮した設計の飼料は過

剰な脂肪蓄積を抑制できる可能性が示唆された。

以上より、肥育後期のブロイラーにとって、単純な窒素源として CP の設計値を上げるよりも、必須アミノ酸を中心としたアミノ酸の組成を維持しながら有効アミノ酸を強化した BP 強化飼料の方が FCR を改善するためには効果が大きく、増体性能の改善においても BP 強化が有効であることが推察された。一方で、現場のコマーシャル農場レベルでの視点からは、高 ME が FCR を改善するとの見方も根強くあり、BP 強化よりも ME を高めることが肥育後期飼料にとって重要であるとの見解も存在する。さらには、BP 強化によってブロイラーの ME 要求量の変動する可能性が推測される。そこで次節では、ブロイラーの肥育後期飼料における BP 水準強化下において、ME 水準の段階的強化が FCR に与える影響を確認することを試みた。

表 2-2-1. 各試験飼料の組成および計算値

試験飼料 原料 (%)	CP 強化区	BP 強化区	各栄養素組成 計算値	CP 強化区	BP 強化区
とうもろこし・中	54.52	54.51	粗タンパク質 (%)	19.4	19.4
マイロ・中	7.84	8.24	粗脂肪 (%)	7.00	6.90
大豆油かす (HP)	22.75	22.10	粗繊維 (%)	2.90	2.90
なたね油かす	5.00	5.00	粗灰分 (%)	5.10	5.10
魚粉 (65%)	3.00	3.00	ME(kcal/kg)	3,200	3,200
Y.G. (27 度)	4.70	4.59	カルシウム (%)	0.90	0.90
L-リシン (98.5%)	-	0.160	総リン (%)	0.56	0.56
DL-メチオニン (99%)	0.130	0.270	有効リン (%)	0.30	0.30
L-スレオニン (98.5%)	-	0.050	A. Lys (%)	0.96	1.07
炭酸カルシウム (粉)	1.120	1.130	A. Met (%)	0.42	0.56
リン酸カルシウム(トリカホス)	0.580	0.590	A. Met+Cys (%)	0.69	0.83
食塩	0.160	0.160	A. Thr (%)	0.68	0.72
フィターゼ	0.100	0.100	A. Arg (%)	1.14	1.12
ビタミンミネラルプレミックス*	0.100	0.100			

※設計したアミノ酸はすべて有効アミノ酸の計算値とした。

※A. Lys, 有効リジン; A. Met, 有効メチオニン; A. Met+Cys, 有効メチオニン+シスチン; A. Thr, 有効スレオニン; A. Arg, 有効アルギニン

* ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; メナジオン 2.9mg/kg; ビタミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン 0.13mg; ピリドキシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨウ素 1.3mg

参考)

CP強化区の有効アミノ酸設計値はチャンキーマニュアル 2009年度版のフィニッシャー2 (F2) の 100%とし、CPの設計値は F2 の 120%とした BP強化区の計算値に合わせた。また、F2の有効アミノ酸の水準は、A. Lys 0.89%、A. Met 0.35%、A. Met+Cys 0.69%、A. Thr 0.60%、A. Arg 0.93%であり、CP強化区の有効アミノ酸計算値は、A. Met+Cysを除き、設計値である F2 の 100%を上回る水準となった。

表 2-2-2. 各試験飼料の成分分析値（公定法）

試験区	CP 強化区	BP 強化区
粗タンパク質 (%)	20.74	20.37
粗脂肪 (%)	7.10	6.81
粗繊維 (%)	2.05	2.33
粗灰分 (%)	4.77	4.67
水分 (%)	11.60	11.73
カルシウム (%)	0.83	0.82
総リン (%)	0.57	0.57
T. Lys (%)	1.16	1.31
T. Met (%)	0.48	0.58
T. Cys (%)	0.37	0.36
T. Thr (%)	0.82	0.91
T. Arg (%)	1.26	1.29

※アミノ酸はすべて総アミノ酸の分析値

※ T. Lys, 総リジン; T. Met, 総メチオニン; T. Cys, 総シスチン;

T. Thr, 総スレオニン; T. Arg, 総アルギニン

*Cys: LC/MS を用いた分析で、標準品をシステイン酸 (Cya) とし、システイン (CysH) の分析値を元にシスチン量として換算した。

表2-2-3. CP強化飼料およびBP強化飼料をROSS308系ブロイラーに給与したときの各生産成績指標に及ぼす影響^{*1}

試験区*2	CP強化区			BP強化区		
生体重, g/羽						
19日齡	830	±	42	830	±	43
30日齡	2036	±	85	2084	±	104
35日齡	2685	±	90	2741	±	150
42日齡	3305	±	101	3423	±	183
増体重, g/羽						
後期（19～30日齡）	1205	±	45	1254	±	68
仕上期（30～42日齡）	1270	±	34	1339	±	82
試験期間（19～42日齡）	2475	±	66	2593	±	150
飼料摂取量, g/羽						
後期（19～30日齡）	1826	±	52	1813	±	74
仕上期（30～42日齡）	2499	±	105	2496	±	137
試験期間（19～42日齡）	4324	±	134	4307	±	208
飼料要求率(FCR)						
後期（19～30日齡）	1.515	±	0.017	1.446	±	0.031 **
仕上期（30～42日齡）	1.967	±	0.034	1.865	±	0.028 **
試験期間（19～42日齡）	1.747	±	0.010	1.662	±	0.027 **
平均値±標準偏差, n=4						

平均値±標準偏差, n=4

** P < 0.01で有意差あり

*1 生産成績は各日齢における生体重ならびに、各日齢間（後期、仕上期および通期の試験期間）における増体重、飼料摂取量およびFCRとした

*2 チャンキーマニュアル2009年度版の栄養成分表のフィニッシャー2に記載された有効アミノ酸水準を基準(100%)とし、120%に強化した飼料をBP強化飼料(BP強化区, CP19.4%)、有効アミノ酸を100%とし、BP強化飼料のCP計算値と同水準に合わせた飼料をCP強化飼料(CP強化区, CP19.4%)とした

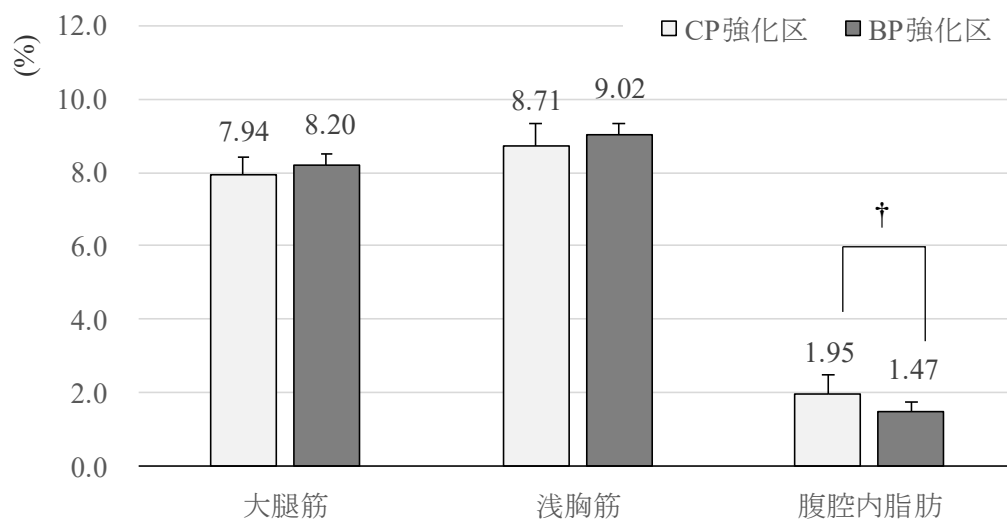


図 2-2-1. 試験終了 42 日齢における CP 強化もしくは BP 強化飼料を給餌したブロイラーの生体重あたりの鶏肉および腹腔内脂肪の歩留りの比較 (%)

平均値±標準偏差 (n=8)

† 両試験区の違いがある傾向あり (P = 0.052)

大腿筋 (モモ肉) および浅胸筋 (ムネ肉) は片胸のみの歩留りを示した

第 3 節

ME の設定水準が FCR に及ぼす影響

1. 緒言

第 1 節の試験において、現代のブロイラーの FCR に対する反応は ME 水準の強化よりも有効アミノ酸水準の強化の方が強いことの可能性を示し、さらに第 2 節において粗タンパク質中に含まれる有効アミノ酸のバランスを考慮したバランスタンパク質 (BP) が重要であることを示した。第 1 節の試験では ME を高めることに伴う飼料摂取量の抑制が見られなかったが、従来、鶏はエネルギー摂取量を調整すると考えられており、高 ME 飼料を給与した場合において食下量の減少により、他の栄養素、とりわけタンパク質の摂取量も減少する可能性が示唆される。このことから、飼料中の ME とタンパク質のバランスが重要であることが過去から提唱されており、カロリー・タンパク比としての指標がある (カロリー・タンパク質比 = 代謝エネルギー含量 (kcal/kg) ÷ 粗タンパク質含量 (%))。肥育後期におけるカロリー・タンパク質比は 170~190 (広い比) が推奨されている (動物栄養学, 朝倉書店)。この考え方をを用いた試験として、Leeson ら (1996) はカロリー・タンパク質比を 178.3 に固定し、ME3,210kcal/kg および CP18.0% からそれぞれ 50% 相当の値となる 1,605kcal/kg および CP9.0% まで引き下げられた 6 段階の飼料を作出し、35 日齢から 49 日齢までブロイラーに給与した。その結果、栄養素量を半分に引き下げた配合飼料を給与しても鶏が飼料摂取量を増やし、増体重への影響は少なかったことを示している (表 2-3-1)。飼料摂取量が増加するため FCR は悪化するがカロリー・タンパク質比を一定に維持することで増体には影響を与えないと推察される。

第 1 節における試験結果からは有効アミノ酸を高めるにつれ FCR は改善傾向にあったが、飼料摂取量が減少する傾向が見られていた。すなわち、高 BP 条件においては現代のブロイラーの生産性を向上させるための ME の要求量も変化する可能性がある。そこで本節では、高 BP 条件下に対して適切な ME 条件を探索するため、ME を段階的に引き上げた配合飼料を設計・作出し、ブロイラーへの給与試験を実施した。

2. 材料および方法

(1) 供試鶏

ROSS308 (UK 産チャンキー) のオスの初生ヒナを株式会社森孵卵場より 500 羽購入し、日本農産工業株式会社畜産技術センターのウインドウレス鶏舎 (ペン室) にて、市販のクランブル飼料「ジョイスタークランブル (CP22%, ME3,050kcal/kg)」を用いて 7 日齢まで、同様にマッシュ飼料「ジョイスター (CP20%, ME3,100kcal/kg)」を用いて 21 日齢まで馴致した。21 日齢で体重の近い個体 300 羽を選抜し、各試験区の平均体重が概ね揃うように 5 試験区 4 反復で割り当てた。本試験で供試しなかった馴致ヒナは別の試験に供試した。舎内温度等の環境条件については ROSS308 Management Handbook (Aviagen) に準じて調整を図った。

(2) 試験区

本試験では、チャンキーマニュアル 2009 年度版のフィニッシャー 2 である有効アミノ酸水準に対し、各々の有効アミノ酸を 115% 強化し、有効リジンのみさらに 5% 増強した有効アミノ酸水準を配合設計の基礎とした。この有効アミノ酸水準に対し、ME を 3,100kcal/kg から 3,300kcal/kg まで 50kcal/kg 刻みで強化した 5 段階の飼料を第 1 節 2(1) で示した飼料システム (日本農産工業(株), 神奈川県横浜市) を用いて LP 計算し、配合設計を行った。本設計に基づき試験飼料を作製した。これらの内容を整理すると表 2-3-2 の通り。各試験飼料の配合内容の詳細は表 2-3-3 に、各栄養成分の分析値は表 2-3-4 に示した。

(3) 測定項目および統計処理

21, 28, 35 および 38 日齢の体重を測定した。また、体重測定日間ごとに残餌量を計測して飼料摂取量を割り出した。これらの計測値を元に各日齢間の羽当たりの増体重および飼料要求率を求めた。体重測定を実施した各日齢において、個体重が明らかに小さかった個体についても群の平均体重に算入したが、スミルノフの棄却検定を行い、危険率 5% で有意と判定された個体については淘汰し、次の期間では斃死鶏扱いとした。これは各期間における飼料摂取量や FCR への影響を極力小さくするための処置である。鶏肉・脂肪歩留まり (大腿筋、

浅胸筋および腹腔内脂肪) については第 1 節で示した方法と同様に測定した。なお、本試験においても歩留まり測定に供しない鶏はすべて株式会社染谷食鳥(茨城県)に適切に出荷した。得られたデータは、統計ソフト R version 3.5.1 (Windows 版) を用い、R コマンダー (Rcmdr) を使用して Tukey の多重比較検定を行った。

3. 結果

試験期間における各日齢での体重および試験終了時点での育成率は表 2-3-5 に示し、各日齢間における増体重、飼料摂取量および FCR の結果は表 2-3-6 に示した。なお、試験期間全体の 21~38 日齢時のときのみ同時に図示した(図 2-3-1, 図 2-3-2, 図 2-3-3)。

試験開始時の 21 日齢から 28、33、35 および 38 日齢までの増体重に関して、各日齢ともに各試験区間に有意差は認められなかった(表 2-3-6)。次に、38 日齢体重では ME3200 区の 3,131g が最も大きく、次いで ME3150 区 3,120g、ME3250 区 3,073g、ME3100 区 3,053g、ME3300 区 3,044g の順となり、必ずしも ME を強化することで体重が大きくなる結果とはならなかった(表 2-3-5)。一方、21~38 日齢の FCR は ME を強化するのに伴い良化する結果となり、ME3100 区の 1.540 に対し、一番 ME 設計値の高い ME3300 区では 1.471 と有意に改善した($P < 0.05$)(表 2-3-6)。

4. 考察

本節では有効アミノ酸設計が高い条件下における適正な ME 含量の探索のため、ブロイラーの肥育後期において、有効アミノ酸設計値をチャンキーマニュアル 2009 年度版(CHM2009)のフィニッシャー 2(F2)の 115%に高めたときに生産効率が至適となる ME 値の探索を行った。

その結果、FCR は ME 水準を強化するにつれ改善する傾向が見られた。第 1 節の試験結果では有効アミノ酸設計を F2 の 100%とした際において ME 水準を強化しても FCR の改善は見られなかったが、有効アミノ酸を高めた条件下においては、ME を強化することで FCR が改善することが示唆された。一方、本試験では ME の強化に伴い FCR は改善傾向を示したが、ME3250 区および ME3300

区においては食下量が低減する傾向が見られた(図 2-3-1, 図 2-3-2, 図 2-3-3)。従来、鶏はエネルギー摂取量のある範囲内で調整する能力を備えていると考えられている。たとえば、Leeson ら (1996) は、飼料中の ME を 2,700kcal/kg から 3,300kcal/kg まで 200kcal/kg 毎に設定した飼料をブロイラーに給与した結果、鶏自らが飼料摂取量を調整し、摂取エネルギーを調整したことを示している。本試験では同報告のような大幅な範囲での ME 設計はしていなかったものの、鶏が摂取 ME を調整した可能性が示唆された。ここで、増体重 (kg) あたりの ME 摂取量 (kcal/kg) によって求められるカロリー効率 (Caloric conversion) を算出すると、ME3100 区 4,772、ME3150 区 4,782、ME3200 区 4,780、ME3250 区 4,810 ならびに ME3300 区 4,853 となった (表 2-3-7)。ME3100 区、ME3150 区および ME3200 区で同等であったのに対し、ME3250 区、ME3300 区と若干増加する傾向が見られた。Dozier ら (2011) は 36 日齢から 47 日齢のブロイラーを用いた給与試験で飼料中の ME を 3,140 から 3,240kcal/kg まで 20kcal/kg ずつ増加させた結果、カロリー効率は 3,200kcal/kg でプラトーに達したことを示していたが、本試験では ME3,250kcal/kg より強化すると反対にカロリー効率が悪化する傾向が見られた。そこで、飼料中の ME を x 軸、カロリー効率を y 軸とした散布図を描き、折れ線回帰分析を行ったところ、変局点は約 3,213kcal/kg と推定された (図 2-3-4)。ME3250 区および ME3300 区では飼料摂取量が低減する傾向が見られたことから、ME3,213kcal/kg 程度で概ね充足した結果、それ以上に ME を強化した区においてはカロリー効率が悪化する傾向にあった可能性が示唆された。また、先述の Leeson らのグループは、先述の報告内において摂取した過剰な ME は腹腔内脂肪に変換されることを示している。本試験の腹腔内脂肪の歩留まりについて有意差は認められなかったものの、ME3200 区、ME3250 区および ME3300 区において ME3100 区および ME3150 区よりも増加する傾向が見られた (表 2-3-8)。3,250kcal/kg 以上の ME 含量では腹腔内脂肪が増える傾向が見られたことから、産肉性にとっては当該水準の ME は過多傾向にある可能性もあることが示唆された。

一般に飼料中の ME を強化すると油脂の添加量が増え、粗脂肪量も増加する。したがって、鶏が摂取 ME を調整する際、摂取する粗脂肪含量に反応している可能性も考えられる。本試験でも飼料中の粗脂肪含量が増加していたことから摂取脂肪量に着目した。その結果、21~38 日齢の羽当たりの摂取粗脂肪量は、ME3100 区 164.4g、ME3150 区 182.2g、ME3200 区 207.6g、ME3250 区 223.9g お

よび ME3300 区 254.8g と、ME 水準の強化に伴い直線的に増加し、粗脂肪の摂取量が調整された傾向は認められなかった（図 2-3-5）。このことから、本試験における鶏の飼料摂取量の違いは飼料中の粗脂肪含量に起因するものではないものと推察された。

以上の結果から、現代のブロイラーに対し、飼料中の有効アミノ酸を一定水準に高め、かつ ME 水準を強化することで FCR の改善に有効であることが示唆された。しかしながら、第 1 節の試験の通り、ROSS308 の栄養指標であるチャンキーマニュアル（2009 年度版）で推奨される有効アミノ酸レベルにおいては ME 強化への反応が見られなかった上、本節の試験では ME 強化による飼料摂取量の低減した結果、必ずしも増体重の改善には至らなかった。また、本節における給与試験では有効アミノ酸設計を 115% 強化としたが、さらに強化した場合における反応については不明瞭である。したがって、次節では BP および ME の水準を数段階設け、網羅的な給与試験により現代のブロイラーの生産成績に与える影響について概観することとした。

表2-3-1. 35～49日齢における低栄養密度の仕上飼料に対するオスブロイラーの反応

飼料ME (kcal/kg)	飼料CP (%)	体重(g)			飼料摂取量(g)	飼料要求率
		35日齢	42日齢	49日齢	35-49日齢	35-49日齢
3,210	18.0	1,840	2,420	2,948	2,583	2.34
2,890	16.2	1,811	2,367	2,921	2,763	2.49
2,570	14.4	1,809	2,320	2,879	2,904	2.72
2,250	12.6	1,815	2,263	2,913	3,273	2.99
1,925	10.8	1,800	2,170	2,913	3,673	3.31
1,605	9.0	1,814	2,218	2,892	4,295	4.01

LEESONら(1996)の報告より引用改変

※LEESON ら(1996a)の報告内の Table7 および Table8 のデータを用いて作成

表2-3-2. 各試験区の栄養設計の概要

栄養成分値	単位	ME3100区	ME3150区	ME3200区	ME3250区	ME3300区
ME	kcal/kg	3100	3150	3200	3250	3300
CP ^{*1}	%	18.8	18.7	18.7	18.7	18.7
ME/CP	-	164.9	168.4	171.1	173.8	176.5
有効アミノ酸 ^{*2}	-	F2 115%	F2 115%	F2 115%	F2 115%	F2 115%

*1,2 CPはチャンキーマニュアル2009年度版フィニッシャー2 (F2) で推奨された有効アミノ酸設計から115%に高め、かつ有効リジンのみさらに5%高めた際の計算値を表記した。

※有効リジンのみ各区において5%増強した事由は第3章第2節の結果を受け、リジン含量としてマニュアル値よりも適正と判断したことによる。

表 2-3-3. 各試験飼料の組成および計算値

原料 (%)	ME3100 区	ME3150 区	ME3200 区	ME3250 区	ME3300 区
とうもろこし・中	64.16	61.17	59.85	58.53	57.27
とうもろこし・粉	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
大豆油かす (HP)	19.86	20.74	20.67	20.60	20.67
なたね油かす	6.13	4.78	5.11	5.44	5.59
魚粉 (65%)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Y.G. (27 度)	3.09	3.83	4.90	5.96	7.00
炭酸カルシウム (粉)	1.070	1.070	1.060	1.060	1.060
リン酸カルシウム (トリカホス)	0.510	0.530	0.530	0.530	0.530
食塩	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
L-リジン (98.5%)	0.200	0.190	0.190	0.190	0.190
DL-メチオニン (99%)	0.240	0.250	0.250	0.250	0.250
L-スレオニン (98.5%)	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
フィターゼ	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
ビタミンミネラルプレミックス*	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
粗タンパク質 (%)	18.80	18.70	18.70	18.70	18.70
粗脂肪 (%)	5.00	5.68	6.69	7.69	8.67
粗繊維 (%)	1.93	1.84	1.86	1.88	1.89
粗灰分 (%)	4.86	4.86	4.87	4.89	4.90
ME(kcal/kg)	3,100	3,150	3,200	3,250	3,300
カルシウム (%)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
総リン (%)	0.56	0.55	0.55	0.55	0.55
有効リン (%)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
A. Lys(%)	1.078	1.071	1.072	1.073	1.075
A. Met(%)	0.529	0.535	0.535	0.535	0.535
A. Met+Cys(%)	0.792	0.795	0.795	0.795	0.795
A. Thr(%)	0.694	0.691	0.691	0.691	0.691
A. Arg(%)	1.079	1.079	1.079	1.079	1.080

※ 試験飼料名は設定した ME(kcal/kg)値で示した。すなわち、ME3100 区は ME3,100kcal/kg、ME3150 区は ME3,150kcal/kg、ME3200 区は ME3,200kcal/kg、ME3250 区は ME3,250kcal/kg、ME3300 区は ME3,300kcal/kg の飼料設計となっていることを表わす。

※ A. Lys, 有効リジン; A. Met, 有効メチオニン; A. Met+Cys, 有効メチオニン+シスチン; A. Thr, 有効スレオニン; A. Arg, 有効アルギニン

* ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; ナシオン 2.9mg/kg; ビタミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン 0.13mg; ビリトキシシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨウ素 1.3mg

表 2-3-4. 各試験飼料の成分分析値（公定法）

試験区	ME3100 区	ME3150 区	ME3200 区	ME3250 区	ME3300 区
粗タンパク質 (%)	19.87	19.81	19.26	19.20	18.93
粗脂肪 (%)	5.33	5.80	6.66	7.47	8.68
粗繊維 (%)	2.20	2.11	2.14	2.00	1.82
粗灰分 (%)	4.71	4.48	4.31	4.16	4.27
水分 (%)	12.67	12.61	12.49	12.36	12.20
カルシウム (%)	0.83	0.82	0.82	0.79	0.79
総リン (%)	0.57	0.57	0.55	0.54	0.55
T. Lys (%)	1.16	1.31	1.25	1.18	1.07
T. Met (%)	0.48	0.58	0.61	0.53	0.49
T. Cys* (%)	0.37	0.36	0.34	0.34	0.34
T. Thr (%)	0.82	0.91	0.86	0.79	0.78
T. Arg (%)	1.26	1.29	1.26	1.15	1.18

※本試験では 5 成分のみ分析した

※分析結果は各区 2 バッチの製造を実施したため、2 バッチの平均値とした

※T. Lys, 総リジン; T. Met, 総メチオニン; T. Cys, 総シスチン; T. Thr, 総スレオニン; T. Arg, 総アルギニン

*T. Cys: LC/MS を用いて分析を行い、システイン酸の分析値から 1/2 システインとしてシスチン含量に換算した。

表2-3-5. バランスタンパク質(BP)を高水準に設計し、ME水準を3,100から3,300kcal/kgまで強化した飼料をROSS308系ブロイラーに給与したときの各日齢における生体重および試験終了42日齢時点における育成率の比較^{*1}

試験区*2	BP (%)	ME (kcal/kg)	生体重, g/羽					育成率*3, %
			21日齢	28日齢	33日齢	35日齢	38日齢	38日齢時
ME3100区	115	3,100	1049 ± 2.6	1804 ± 22	2324 ± 50	2677 ± 56	3053 ± 96	96.3
ME3150区	115	3,150	1051 ± 5.8	1827 ± 16	2462 ± 29	2715 ± 32	3120 ± 33	98.3
ME3200区	115	3,200	1045 ± 1.1	1803 ± 13	2458 ± 32	2719 ± 30	3131 ± 26	100
ME3250区	115	3,250	1048 ± 4.7	1798 ± 12	2428 ± 17	2671 ± 18	3073 ± 7	98.3
ME3300区	115	3,300	1048 ± 2.2	1808 ± 14	2438 ± 28	2675 ± 44	3044 ± 71	96.7
平均値±標準偏差, n = 4								

*1,2 チャンキーマニユアル2009年度版の栄養成分表のフィニッシャー2に記載された有効アミノ酸(AA)水準を基準に有効ジンのみ5%強化した、バランスタンパク質(BP)をBP100%とし、MEを3,100kcal/kgから3,300kcal/kgまで50kcal/kg刻みに強化した飼料を作出した。すなわち、ME3100区はME3,100kcal/kg、ME3150区はME3,150kcal/kg、ME3200区はME3,200kcal/kg、ME3250区はME3,250kcal/kg、ME3300区はME3,300kcal/kgの飼料設計となっていることを表わす。

*3 育成率は斃死および各日齢での体測時においてスルノフの棄却検定により危険率5%で除外された際に淘汰した鶏を含む

表2-3-6. バランスアミノ酸を高水準とし、ME水準をME水準を3,100から3,300kcal/kgまで強化した飼料をROSS308系ブロイラーに給与したとき
の各生産成績指標に及ぼす影響^{*1}

試験区 ^{*2}	ME3100区		ME3150区		ME3200区		ME3250区		ME3300区	
	増体重, g/羽		増体重, g/羽		増体重, g/羽		増体重, g/羽		増体重, g/羽	
21～28日齢	755	± 21	776	± 12	758	± 14	750	± 14	760	± 15
21～33日齢	1376	± 50	1411	± 24	1413	± 33	1380	± 14	1390	± 40
21～35日齢	1628	± 56	1664	± 28	1674	± 31	1624	± 14	1628	± 47
21～42日齢	2004	± 97	2069	± 29	2087	± 27	2025	± 11	1996	± 73
飼料摂取量, g/羽										
21～28日齢	1102	± 28	1118	± 15	1079	± 16	1054	± 14	1057	± 20
21～33日齢	2048	± 83	2084	± 26	2044	± 33	1981	± 9	1982	± 43
21～35日齢	2458	± 94	2495	± 27	2468	± 31	2374	± 11	2359	± 74
21～42日齢	3085	± 138	3141	± 36	3117	± 22	2997	± 23	2936	± 111
飼料要求率(FCR)										
21～28日齢	1.459	± 0.030	1.441	± 0.007	1.424	± 0.011	1.406	± 0.013	1.390	± 0.013
21～33日齢	1.489	± 0.011	1.477	± 0.007	1.447	± 0.012	1.436	± 0.016	1.426	± 0.012
21～35日齢	1.510	± 0.017	1.500	± 0.009	1.474	± 0.013	1.462	± 0.018	1.450	± 0.006
21～42日齢	1.540	± 0.015	1.518	± 0.005	1.494	± 0.013	1.480	± 0.006	1.471	± 0.011
平均値±標準偏差, n=4										

a-c 異なる肩文字をもつもの同士の間には有意差あり (P < 0.05)

*1 生産成績は試験開始の21日齢を基準とし、各日齢間(28, 33, 35および38日齢)における増体重、飼料摂取量およびFCRとした

*2 チャンピオンニユアル2009年度版の栄養成分表のフイニジンジャー2に記載された有効アミノ酸(AA)水準を基準に有効アミノ酸のみ5%強化したバランスタンパク質(BP)を BP100%とし、MEを3,150kcal/kgから3,300kcal/kgまで50kcal/kg刻みに強化した飼料を作出した。すなわち、ME3100区はME3,100kcal/kg、ME3150区はME3,150kcal/kg、ME3200区はME3,200kcal/kg、ME3250区はME3,250kcal/kg、ME3300区はME3,300kcal/kgの飼料設計となっていることを表わす。

表2-3-7. バランスタンパク質(BP)を高水準に設計し、ME水準を3,100から3,300kcal/kgまで強化した飼料をROSS308系
ブロイラーに給与したときの21日齢から38日齢における羽当たりおよび体重当たりのCPおよびME摂取量の比較^{*1}

試験区 ^{*2}	BP (%)	ME (kcal/kg)	増体重 (g/羽)	飼料摂取量 (g/羽)	CP摂取量 (g/羽) ^{*3}	CP摂取量 /増体重	ME摂取量 (kcal/羽)	ME摂取量 /増体重
ME3100区	115	3,100	2004	3085	613	258	9562	4772
ME3150区	115	3,150	2069	3141	622	301	9894	4782
ME3200区	115	3,200	2087	4117	600	288	9974	4780
ME3250区	115	3,250	2025	2997	575	284	9740	4810
ME3300区	115	3,300	1996	2936	556	278	9689	4853

*1 各試験区の結果を基に算出した

*2 チヤンキーマニユアル2009年度版の栄養成分表のフィニッシャー2に記載された有効アミノ酸(AA)水準を基準に有効リジンの
み5%強化したバランスタンパク質(BP)を BP100%とし、MEを3,150kcal/kgから3,300kcal/kgまで50kcal/kg刻みに強化した飼料
を作成した。すなわち、ME3100区はME3,100kcal/kg、ME3150区はME3,150kcal/kg、ME3200区はME3,200kcal/kg、ME3250
区はME3,250kcal/kg、ME3300区はME3,300kcal/kgの飼料設計となっていることを表わす。

*3 CP摂取量は分析値(表2-3-4)×飼料摂取量より算出した

表2-3-8. 試験終了時における鶏肉・脂肪歩留まり^{*1})において有効アミノ酸を高水準条件とし、MEを3,100kcal/kgから3,300kcal/kgに強化した際の飼料^{*2}が及ぼす影響

試験区	ME3100区	ME3150区	ME3200区	ME3250区	ME3300区
処理前生体重 ^{*3} (g/羽)	3398 ± 15	3372 ± 55	3393 ± 34	3394 ± 44	3397 ± 43
組織重量	(g)				
大腿筋	288.2 ± 15.2	288.8 ± 12.5	268.4 ± 8.3	270.9 ± 9.5	285.5 ± 16.2
浅胸筋	344.2 ± 17.7	331.9 ± 28.9	346.3 ± 28.2	334.5 ± 28.5	343.0 ± 25.5
腹腔内脂肪	57.5 ± 6.3	53.4 ± 17.4	70.1 ± 14.3	68.0 ± 18.9	68.5 ± 13.7
歩留まり	————— (%) —————				
大腿筋	8.5 ± 0.5	8.6 ± 0.4	7.9 ± 0.3	8.0 ± 0.2	8.4 ± 0.4
浅胸筋	10.1 ± 0.5	9.8 ± 0.8	10.2 ± 0.8	9.9 ± 0.8	10.1 ± 0.8
腹腔内脂肪	1.7 ± 0.2	1.6 ± 0.5	2.1 ± 0.4	2.0 ± 0.6	2.0 ± 0.4
平均値±標準偏差, n = 6					

^{a-c}異なる肩文字を持つもの同士の間で有意差あり (P < 0.05)

*1 鶏肉はモモ肉として大腿筋、ムネ肉として浅胸筋とし右側のみ採取。脂肪は腹腔内脂肪とした

*2 チヤンキーマニョアル2009年度版の栄養成分表のフイニシヤー2に記載された有効アミノ酸(AA)水準を基準に有効リジンのみ5%強化したバラスタンパク質(BP)を BP100%とし、MEを3,150kcal/kgから3,300kcal/kgまで50kcal/kg刻みに強化した飼料を作出した。すなわち、ME3100区はME3,100kcal/kg、ME3150区はME3,150kcal/kg、ME3200区はME3,200kcal/kg、ME3250区はME3,250kcal/kg、ME3300区はME3,300kcal/kgの飼料設計となっていることを表わす。

*3 歩留まり測定に供試した個体の重量を示した

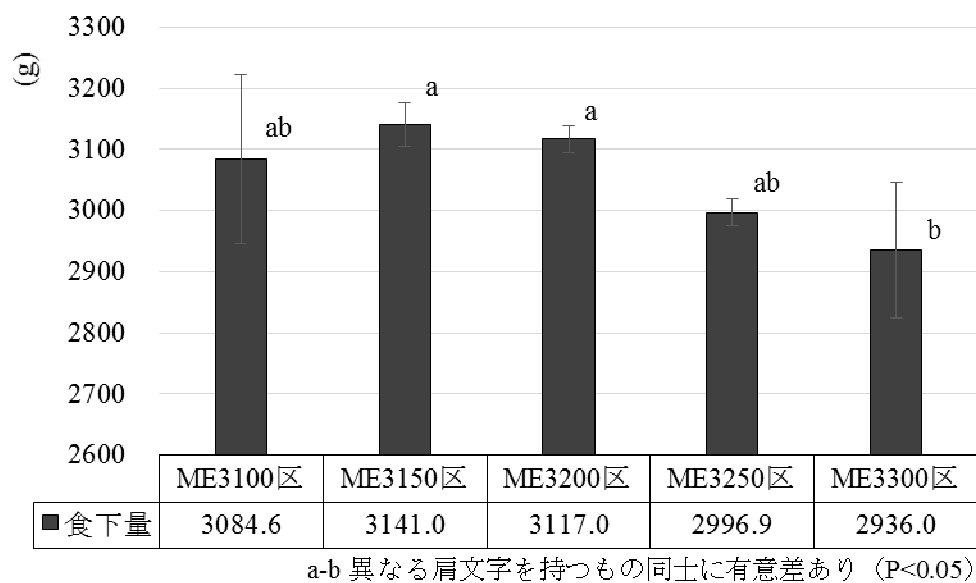


図 2-3-1. 21～38 日 齢 における 各 試 験 区 の 食 下 量 の 比 較

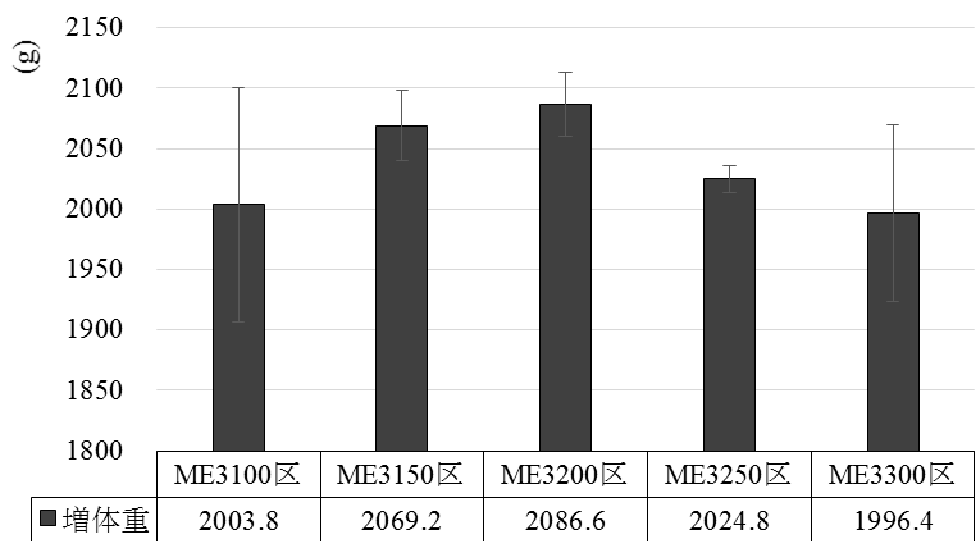
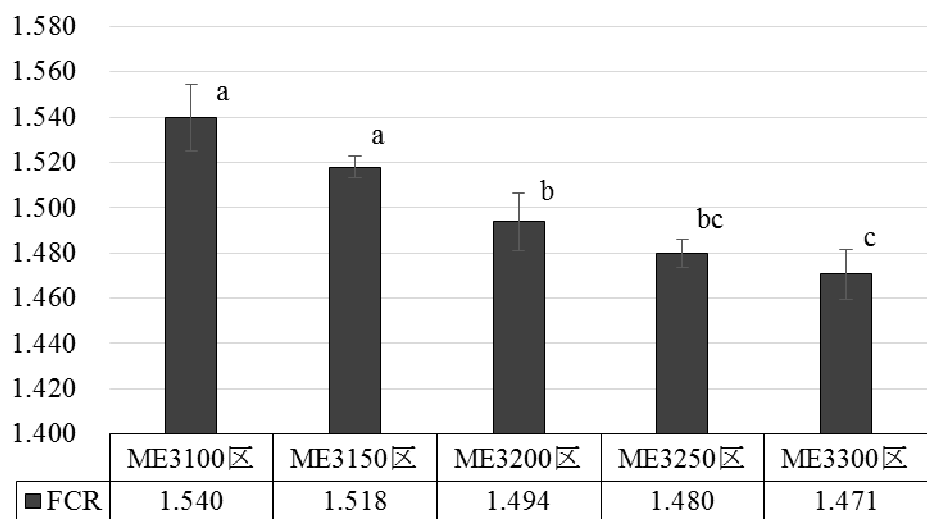


図 2-3-2. 21～38 日 齢 における 各 試 験 区 の 増 体 重 の 比 較



a-c 異なる肩文字を持つもの同士に有意差あり (P<0.05)

図 2-3-3. 21～38 日 齢 における 各 試 験 区 の FCR の 比 較

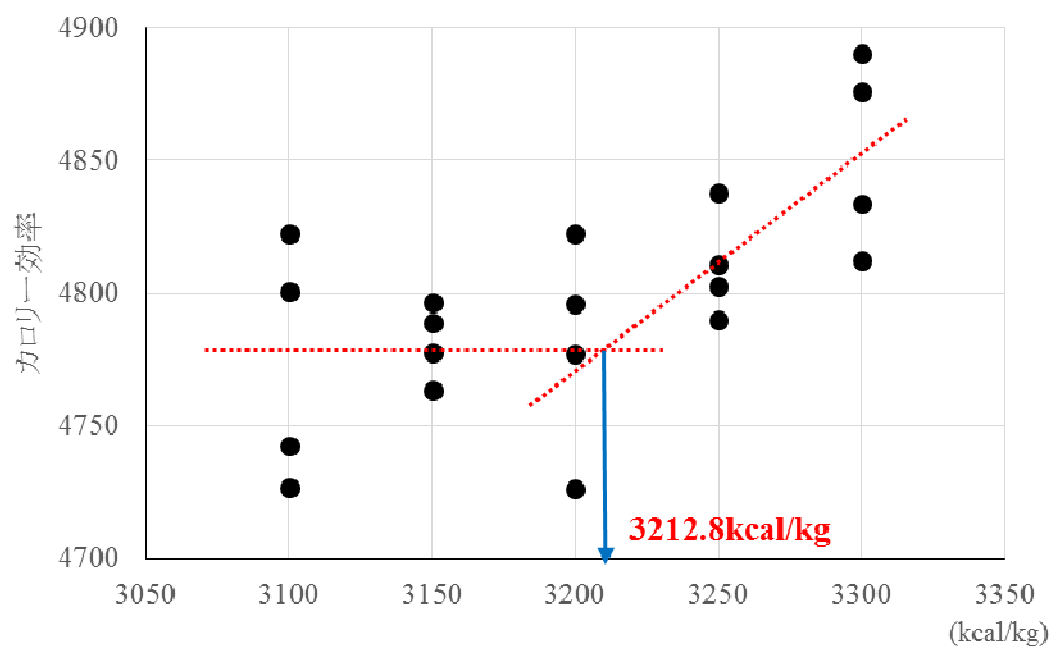


図 2-3-4. 飼 料 中 の ME 水 準 に 対 す る 21～38 日 齢 時 に お け る
ブ ロ イ ラ ー の カ ロ リ ー 効 率 * の 散 布 図 お よ び 折 れ 線 回 帰 グ ラ フ

*カロリー効率=ME 摂取量 (kcal/羽) / 増 体 重 (g/羽)

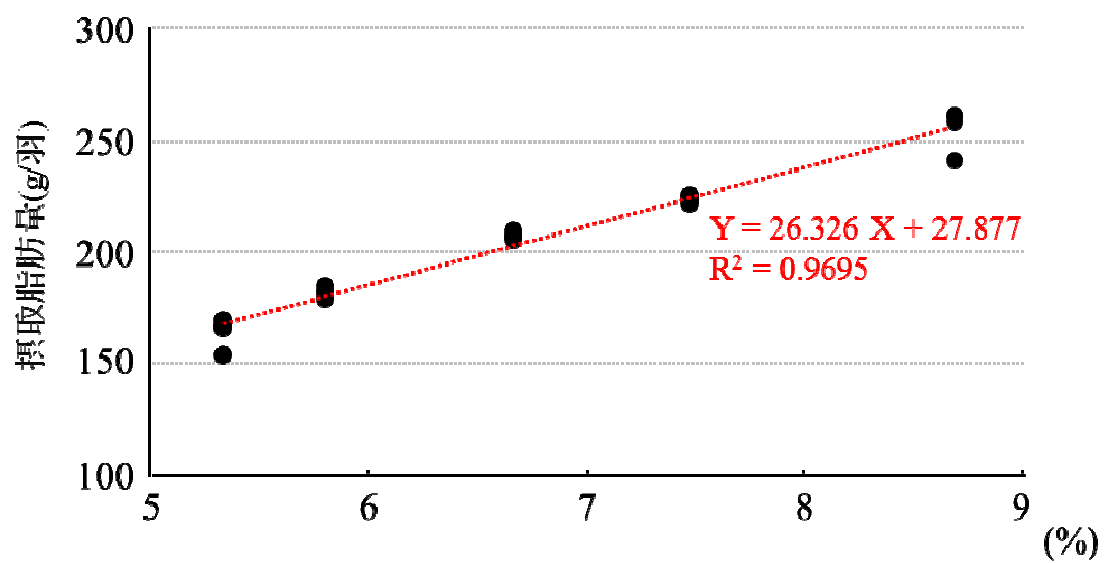


図 2-3-5. 飼料中の粗脂肪含量に対するブロイラー1羽当たりの脂肪摂取量

第 4 節

ME および有効アミノ酸の設定水準が FCR に及ぼす影響

1. 緒言

本章ではこれまで飼料中の ME および CP に対するブロイラーの増体性能への反応についてと、CP を構成するアミノ酸の組成について検討してきた。その結果、従来 FCR の改善に効果が高いとされてきた ME 強化よりも、近年のブロイラーでは肥育後期においてもバランスアミノ酸を考慮したバランスタンパク質（BP）強化の方が改善効率がよいとの知見が得られた。しかしながら、第 3 節の試験結果からは BP 強化と合わせて ME を同時に強化すると更に FCR が改善する傾向も見られた。その一方で飼料摂取量が低減し、増体重の改善においては必ずしも ME 強化が有効ではない可能性が示唆された。

そこで本節では、現在のブロイラーの飼料栄養に対する反応を再確認するため BP を 4 段階と ME を 4 段階組み合わせた計 16 試験区を設け、マトリックス上の網羅的な試験を実施し、ブロイラー肥育後期の FCR において最適な BP および ME 条件を探索することとした。

2. 材料および方法

(1) 供試鶏

ROSS308（UK 産チャンキー）のオスの初生ヒナを株式会社森孵卵場より 600 羽購入し、日本農産工業株式会社畜産技術センターのウインドウレス鶏舎（ペン室）にて、市販飼料「ジョイスター克蘭ブル（CP22%、ME3,050kcal/kg）」の克蘭ブル飼料を用いて 9 日齢まで飼育した。9 日齢時にて体重の近い個体 416 羽を選抜し、平均体重が概ね揃うように、16 の試験区に 26 羽ずつ割り当てた（平均体重約 295g）。さらに 21 日齢まで CP20.2%、ME3,100kcal/kg のマッシュ飼料を用いて馴致した。21 日齢にて平均体重が近くなるように各区において個体を 22 羽ずつ選抜し（全体の平均体重 $1,173 \pm 4.1$ ）、各々に対して定められた試験飼料を給与した。試験に供試しなかった馴致ヒナは成長が著しく悪かつ

た個体については頸椎脱臼による淘汰を実施し、その他の個体は別の試験に使用した。舎内温度等の環境条件については ROSS308 Management Handbook (Aviagen)に準じて調整を図った。

(2) 試験区

本試験では、BP 水準 4 段階および ME 水準 4 段階を組み合わせる形で試験飼料を作製した。本試験における BP の水準は、チャンキーマニュアル 2009 年度版 (CHM2009) のフィニッシャー2 である有効アミノ酸水準を基準とし、有効リジンのみ 5% 増強した設計を BP100% とした。これを基準として BP を 7% 刻みに強化し、BP107%、BP114% および BP121% の 4 段階を設けた。一方、ME の水準は、3,150kcal/kg から 50kcal/kg 刻みで強化し、3,150kcal/kg、3,200kcal/kg、3,250kcal/kg および 3,300kcal/kg の 4 段階を設けた。試験区の内容を整理すると以下に示した「各試験区設定の概要」の通り。これらの BP および ME 水準とした各試験飼料の配合率は、第 1 節 2(1)で示した飼料システム (日本農産工業(株), 神奈川県横浜市) を用いて LP 計算して作成した。この配合率の内容に基づき試験飼料を作製した。各試験飼料の詳細はバランスアミノ酸水準 4 段階毎にまとめ、表 2-4-1a, -1b, -1c, -1d に示した。

各試験区設定の概要

ME (kcal/kg)	バランスアミノ酸 (%)※ ¹ (CP, %)			
	100 (17.0)	107 (17.4)	114 (18.5)	121 (19.6)
3150	試験区 1	試験区 5	試験区 9	試験区 13
3200	試験区 2	試験区 6	試験区 10	試験区 14
3250	試験区 3	試験区 7	試験区 11	試験区 15
3300	試験区 4	試験区 8	試験区 12	試験区 16

※¹ CHM2009 フィニッシャー2 の有効アミノ酸値を基準とした。ただし、有効リジンのみ各区において 5% 増強しており、これを含んだバランスアミノ酸を BP100% とした。CHM2009 の指標にあるアミノ酸のうちリジンのみ強化した事由は第 3 章第 2 節の結果を受け、リジン含量としてマニュアル推奨値よりも適正と判断したことによる。また、各々のバランスアミノ酸としたときの CP 値を () 内に計算値で示した。

(3) 測定項目および統計処理

21, 28, 35, 38 および 42 日齢において体重を計測し、体重測定日ごとに各試験区の残餌量を計測して羽当たりの飼料摂取量を割り出した。これらの計測値を元に各日齢間の羽当たりの増体重および飼料要求率を算出した。また、試験区 1, 4, 13 および 16 の鶏肉・脂肪歩留まり（大腿筋、浅胸筋および腹腔内脂肪）を測定した。鶏の処理方法および歩留まり測定の方法については第 1 節で示した方法に準じた。ただし、処理羽数は各区 5 羽とした。なお、歩留まり測定に供試しない鶏は、すべて株式会社染谷食鳥（茨城県）に適切に出荷した。

本節の試験は試験区が多岐に渡ったことから各試験区の反復数を 1 としたため、各日齢での体重を除き、生産成績の各パラメータについて統計処理することができなかった。そのため、評価における代替方法として等高線図を用いて飼料栄養が FCR および増体重へ及ぼす影響の推定図を作成することを試みた。なお、第 3 節の試験と同様に体重測定を実施した各日齢において、個体重が明らかに小さかった個体についても群の平均体重に算入したが、スミルノフの棄却検定を行い、危険率 5% で有意と判定された個体については淘汰し、次の期間では斃死鶏扱いとした。これは各期間における飼料摂取量や FCR への影響を極力小さくするための処置である。また、試験終了時における歩留まりについて、統計ソフト R version 3.5.1 (Windows 版) を用い、R コマンダー (Rcmdr) を使用して Tukey の多重比較検定を行った。

3. 結果

試験期間における各日齢での体重および試験終了時点での育成率は表 2-4-2 に示し、各日齢間における増体重、飼料摂取量および FCR の結果は表 2-4-3 に示した。

試験期間（21～42 日齢）の増体重に対する BP および ME の強化を検証するため、x 軸に BP 水準もしくは ME 水準とした散布図を描いた（図 2-4-1a, 図 2-4-1b）。BP 水準の強化に従い正の相関が見られ増体重は改善する傾向が見られた ($r = 0.566$)。一方、ME 水準の強化では相関性は見られなかった ($r = 0.168$)。同様に飼料摂取量に対する BP および ME 強化の反応についても散布図を描いた（図 2-4-2a, 図 2-4-2b）。BP 水準および ME 水準の強化による相関係数は各々

$r = -0.501$ および $r = -0.487$ との負の相関が得られた。本結果からは BP および ME 共に水準を強化することで飼料摂取量が減少する傾向が見られたが、BP および ME のどちらが摂食性の制限因子であるかは不明瞭であった。なお、試験開始から 1 週間（21～28 日齢）の飼料摂取量に着目すると相関係数は BP 水準の強化で $r = -0.583$ 、ME 水準の強化で $r = -0.340$ と ME 強化よりも BP 強化の方が食下量の低減に寄与する傾向が見られた（データ図示せず）。また、BP 水準においては 107% 強化以上、ME においては 3,300kcal/kg 強化で食下量が低減する傾向が見られた。折れ線回帰分析によると、同期間における飼料摂取量は BP108.7% および ME3,243kcal/kg より強化した設計とした場合において低減するものと推定された（図 2-4-3a, 図 2-4-3b）。ただし、21～35 および 38 日齢の期間では 21～42 日齢と同様、飼料摂取量は直線的に低減する傾向が見られ（データ図示せず）、この反応は 21～28 日齢での特異的な反応であった。次に FCR に対する BP および ME 強化の反応について散布図を描いた（図 2-4-4a, 図 2-4-4b）。すべての ME 水準（3,150～3,300kcal/kg）において、BP 強化に伴い FCR は直線的に改善し、強い負の相関が見られた（ $r = -0.810$ ）。一方、BP においても 100～121% のすべての水準で ME 強化に伴い直線的に FCR が改善する傾向が見られ、線形近似による相関係数も $r = -0.518$ と相関性は認められたが、BP 強化と比較すると弱かった。したがって、相関係数の比較からは 21～42 日齢における FCR は ME よりも BP への反応が強いことが示唆された。

歩留まりについては BP および ME について各々一番強弱の大きい試験区である 4 区間、すなわち、試験区 1（BP100%-ME3150kcal/kg）、試験区 4（BP100%-ME3300kcal/kg）、試験区 13（BP121%-ME3150kcal/kg）および試験区 16（BP121%-ME3300kcal/kg）について測定した（表 2-4-4）。その結果、腹腔内脂肪において、試験区 1 に対し、ME の高い試験区 4 で増加する傾向、BP の高い試験区 13 で減少する傾向が見られたが、有意差は認められなかった。また、大腿筋および浅胸筋の体重に占める歩留まりにおいて、各区間内において腹腔内脂肪同様に有意差は認められなかった。

4. 考察

本節では肥育後期のブロイラーにおいて FCR を改善する最適な BP および ME の水準の条件を探索するため、BP 4 段階×ME 4 段階の格子状に栄養設計し

た飼料を作出し、網羅的な給与試験を行った。

一般にブロイラーにおいて飼料摂取量の制限要因は ME と考えられている (Mbajorgu, 2011)。しかしながら、本試験期間全体では飼料中の ME 水準の強化だけでなく BP 水準の強化によっても直線的に摂取量が抑制される傾向が見られた。ただし、給与期間別に見ていくと、試験開始 1 週 (21~28 日齢) では特に ME よりも BP に反応して飼料摂取量が抑制される傾向が強かった。また、同ステージでは、BP および ME 共に一定レベルまでは食下量低減の影響が認められなかった。折れ線回帰分析からは BP108.7% もしくは ME3,243kcal/kg が食下量低減の変局点であることが推定されたが、飼料摂取量が抑制される事象は BP および ME の強化により常に直線的ではない可能性が示唆された。一方、増体重は試験区 11 (BP114%-ME3250kcal/kg)、試験区 12 (BP114%-ME3300kcal/kg) および試験区 14 (BP121%-ME3200kcal/kg) で大きくなる傾向が見られた (表 2-4-2 増体重)。試験区 11 および試験区 12 は飼料摂取量が減少に転じた付近の BP 水準あるいは ME 水準であったことから、鶏の採食性は栄養要求量の充足に何らかの関係があるかもしれない。なお、給与期間により飼料摂取量の制限要因の傾向が変化した要因としては、鶏体のサイズに影響している可能性が考えられる。本試験結果を考慮すると、①体重が 1,000g から 2,000g 程度までとそれ以上では BP および ME の要求量が異なり反応性が異なる。②早期に増体したことで 28 日齢以降における必要栄養素量に変化したことなどが挙げられる。

ME と CP あるいはアミノ酸の組み合わせは、ME/CP 比や ME/有効リジン比などの試験により、生産成績に大きく影響を及ぼすと考えられている (Kamran ら, 2008)。しかしながら、コマーシャルブロイラーの配合飼料の設計において、ME/CP 比を用いた設計をすることは多くない。これは CP あるいはアミノ酸の変動幅に対して ME の変動幅が大きくなり過ぎるためであり、現実的な栄養設計に反映し難いためである。たとえば、CHM2009 を例に出すと、フィニッシャー 2 の有効リジン推奨量は 0.89% であるが、仮に 3,200kcal/kg を基準とした場合、有効リジンを 10% 強化すると、ME も 10% (320kcal/kg) 強化しなければならず、有効リジン 0.979% に対し ME3,520kcal/kg の設計は現実的ではない。そこで、BP と ME の各々の水準の組み合わせが肥育後期のブロイラーの FCR に与える影響を検証するため、本試験の結果を用いて 21~38 日齢時と 21~42 日齢時の飼料栄養に対する FCR の推定図を作成した (図 2-4-5a, 2-4-5b)。推定図から、FCR は BP 水準および ME 水準共に強化することで改善の傾向が見ら

れたが、体重が 3.1kg 程度であった 21～38 日齢における期間では BP への反応が強く、体重が 3.6kg 程度であった 21～42 日齢まででは BP に加えて ME への反応も強くなる傾向が見られた。仮に CHM2009 にて推奨される栄養素組成に近い試験区 2 (BP100%-ME3200kcal/kg) の飼料を元に、ME もしくは BP を強化して 3.1kg の出荷体重時の FCR の改善を図ろうとする場合、ME を +100kcal/kg 強化 (試験区 4 相当) したとしても改善はなされず、BP を +14% 強化 (試験区 10 相当) すると、FCR を約 0.1 改善できる可能性がある (図 2-4-5a)。しかしながら、BP を +21% 強化 (試験区 14 相当) すると FCR は試験区 2 の 1.788 から 1.575 と大幅に改善したが、同時に ME を +100kcal/kg 強化 (試験区 16 相当) した場合、更なる FCR の改善 (1.482) が見られ、ME 強化による改善も寄与するようになるものと推察された。これらの結果は第 2 節の試験結果を支持する結果であった。3.6kg の出荷体重時 (42 日齢) であっても FCR を改善するためには BP の強化が効果的であり、図 2-3-5b からは BP が高まるにつれ、同時に ME 強化すると改善効果が高まるものと推察された。この理由として、BP 強化に伴い増体重が大きくなることから体重が増加するのに伴い ME 要求量が増加する可能性が示唆される。つまり、増体に必要な体の素材として BP を供給すると体重は増加するが、維持エネルギーや筋肉等の体タンパク質への変換のためのエネルギーを要するようになり ME 要求量が増加した結果であるものと推察された。なお、FCR の推定図と同様に 38 日齢時および 42 日齢時の体重の推定図を図 2-4-6a および図 2-4-6b に示した。どちらの日齢においても BP 水準が上がるにつれ体重が増加する傾向が見られたが、ME 水準への反応は規則性が見受けられなかった。コマーシャルの生産農場では増体改善のために飼料中の ME を強化する取組みが行われることが散見されるが、本結果からは必ずしも増体改善には至らない可能性がある。これは BP 水準および ME 水準の強化による飼料摂取量の低減が関係しているものと考えられ、増体改善には採食性を落とさない手立てが必要になるものと考えられた。

本試験における屠体成績について、飼料中の BP 水準が高いと腹腔内脂肪の歩留りが少なく、ME 水準が高いと逆に多くなる傾向が若干見受けられたが、有意な差は認められず、歩留りの大きな変化や栄養成分に対する傾向は見られなかった。アミノ酸水準および ME 水準の強化による歩留りの評価については、Zhai ら (2014) の報告が挙げられる。同グループは純系統の品種として Cobb700 を、交雑品種として Cobb700 x Cobb500 に対し、アミノ酸と ME の栄養密度を

強弱に設定した飼料 4 種類を給与する試験を行った。その結果、屠体成績としてムネ肉等、一部の部位において品種間での差は見られていたものの、飼料中のアミノ酸と ME のレベルに対する歩留りに交互作用は認められなかったことを報告している。したがって、飼料中の栄養成分による影響は増体や FCR といった生産成績に対する影響は大きい、各部位の筋重量や腹腔内脂肪の歩留り比率には大きな影響を与えない可能性が示唆される。

本試験結果を元にした FCR 推定図により、BP および ME 水準に対する肥育後期のブロイラーの FCR の反応が推測することができた。近年のブロイラーは BP の要求量が増加している傾向があることが示唆され、体重増加と共に ME の要求量も増加するものと推察される。しかしながら、BP の強化は有効アミノ酸の組成を考慮したタンパク質の強化とはいえ、その組成はマニュアルを基準としたものであり、すべてを満たすように設計した場合、飼料中の CP 含量は増加する傾向にある。窒素源の増加は鶏糞にも一定量排泄されるため、環境負荷に繋がる懸念もある。そのため、できる限り CP を削減することが望ましく、可消化率の高い原料を使用したり、消化率を改善させる手法を用いることが理想的である。しかしながら飼料原料は有限であり、各々の原料の消化性についても限りがある。そこで次章ではとうもろこし-大豆油かす主体飼料においてブロイラーが要求する必須アミノ酸のうち、第一制限アミノ酸になりやすいとされるリジンおよびメチオニンの配合含量について検討した。

表 2-4-1a. 各試験飼料の組成および計算値

試験区名(BP-ME) 原料(%)	試験区 1 (100-3150)	試験区 2 (100-3200)	試験区 3 (100-3250)	試験区 4 (100-3300)
とうもろこし・中	67.83	68.97	65.12	63.78
とうもろこし・粉	3.00	3.00	3.00	3.00
大豆油かす (HP)	12.07	12.00	11.94	11.87
なたね油かす	7.80	8.16	8.50	8.84
魚粉 (65%)	4.00	4.00	4.00	4.00
Y.G. (27 度)	2.92	4.00	5.07	6.14
炭酸カルシウム (粉)	1.110	1.100	1.100	1.100
リン酸カルシウム(トリカホス)	0.520	0.520	0.520	0.520
食塩	0.200	0.200	0.200	0.200
L-リジン (98.5%)	0.180	0.180	0.180	0.180
DL-メチオニン (99%)	0.160	0.160	0.160	0.160
L-スレオニン (98.5%)	0.010	0.010	0.010	0.010
塩化コリン	-	-	-	-
フィターゼ	0.100	0.100	0.100	0.100
ビタミンミネラルブレックス*	0.100	0.100	0.100	0.100
粗蛋白質(%)	17.00	17.00	17.00	17.00
粗脂肪(%)	6.20	7.20	8.20	9.20
粗繊維(%)	2.10	2.10	2.10	2.10
粗灰分(%)	4.90	4.90	4.90	4.90
ME(kcal/kg)	3,150	3,200	3,250	3,300
カルシウム(%)	0.90	0.90	0.90	0.90
総リン(%)	0.55	0.55	0.55	0.55
有効リン(%)	0.30	0.30	0.30	0.30
A. Lys(%)	0.93	0.93	0.93	0.93
A. Met(%)	0.44	0.44	0.44	0.44
A. Met+Cys(%)	0.69	0.69	0.69	0.69
A. Thr(%)	0.60	0.60	0.60	0.60
A. Arg(%)	0.93	0.93	0.93	0.93

※ 試験区名については、BP(%)-ME(kcal/kg)を()内に併記した。

※ A. Lys, 有効リジン; A. Met, 有効メチオニン; A. Met+Cys, 有効メチオニン+シスチン; A. Thr, 有効スレオニン; A. Arg, 有効アルギニン

* ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; メナジオン 2.9mg/kg; ビタミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン 0.13mg; ピリドキシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨウ素 1.3mg

表 2-4-1b. 各試験飼料の組成および計算値

試験区名(BP-ME) 原料(%)	試験区 5 (107-3150)	試験区 6 (107-3200)	試験区 7 (107-3250)	試験区 8 (107-3300)
とうもろこし・中	69.76	68.97	67.83	66.71
とうもろこし・粉	3.00	3.00	3.00	3.00
大豆油かす (HP)	18.41	18.82	18.94	19.06
なたね油かす	0.52	-	-	-
魚粉 (65%)	4.00	4.00	4.00	4.00
Y.G. (27 度)	1.71	2.60	3.60	4.60
炭酸カルシウム (粉)	1.120	1.110	1.110	1.110
リン酸カルシウム(トリカホス)	0.590	0.600	0.610	0.610
食塩	0.190	0.190	0.190	0.190
L-リシン (98.5%)	0.190	0.180	0.180	0.180
DL-メチオニン (99%)	0.220	0.220	0.230	0.230
L-スレオニン (98.5%)	0.030	0.040	0.040	0.040
塩化コリン	0.060	0.070	0.070	0.070
フィターゼ	0.100	0.100	0.100	0.100
ビタミンミネラルブレックス*	0.100	0.100	0.100	0.100
粗蛋白質(%)	17.50	17.40	17.40	17.40
粗脂肪(%)	5.00	5.80	6.70	7.70
粗繊維(%)	1.60	1.60	1.50	1.50
粗灰分(%)	4.90	4.90	4.90	4.90
ME(kcal/kg)	3,150	3,200	3,250	3,300
カルシウム(%)	0.90	0.90	0.90	0.90
総リン(%)	0.52	0.51	0.51	0.51
有効リン(%)	0.30	0.30	0.30	0.30
A. Lys(%)	1.00	1.00	1.00	1.00
A. Met(%)	0.52	0.48	0.50	0.52
A. Met+Cys(%)	0.74	0.73	0.74	0.74
A. Thr(%)	0.64	0.65	0.65	0.65
A. Arg(%)	1.00	1.00	1.00	1.00

※ 試験区名については、BP(%)-ME(kcal/kg)を()内に併記した。

※ A. Lys, 有効リジン; A. Met, 有効メチオニン; A. Met+Cys, 有効メチオニン+シスチン; A. Thr, 有効スレオニン; A. Arg, 有効アルギニン

* ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; メナジオン 2.9mg/kg; ビタミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン 0.13mg; ピリドキシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨウ素 1.3mg

表 2-4-1c. 各試験飼料の組成および計算値

試験区名(BP-ME) 原料(%)	試験区 9 (114-3150)	試験区 10 (114-3200)	試験区 11 (114-3250)	試験区 12 (114-3300)
とうもろこし・中	66.70	65.45	64.17	62.89
とうもろこし・粉	3.00	3.00	3.00	3.00
大豆油かす (HP)	20.31	20.31	20.31	20.32
なたね油かす	1.24	1.47	1.69	1.91
魚粉 (65%)	4.00	4.00	4.00	4.00
Y.G. (27 度)	2.16	3.20	4.25	5.30
炭酸カルシウム (粉)	1.110	1.100	1.100	1.100
リン酸カルシウム(トリカホス)	0.570	0.570	0.570	0.570
食塩	0.190	0.190	0.190	0.190
L-リジン (98.5%)	0.200	0.190	0.190	0.190
DL-メチオニン (99%)	0.240	0.240	0.250	0.250
L-スレオニン (98.5%)	0.040	0.040	0.040	0.040
塩化コリン	0.040	0.040	0.040	0.040
フィターゼ	0.100	0.100	0.100	0.100
ビタミンミネラルブレックス*	0.100	0.100	0.100	0.100
粗蛋白質(%)	18.50	18.50	18.50	18.50
粗脂肪(%)	5.40	6.30	7.30	8.30
粗繊維(%)	1.70	1.70	1.70	1.70
粗灰分(%)	5.00	5.00	5.00	5.00
ME(kcal/kg)	3,150	3,200	3,250	3,300
カルシウム(%)	0.90	0.90	0.90	0.90
総リン(%)	0.53	0.53	0.53	0.53
有効リン(%)	0.30	0.30	0.30	0.30
A. Lys(%)	1.07	1.06	1.06	1.06
A. Met(%)	0.53	0.53	0.54	0.54
A. Met+Cys(%)	0.78	0.78	0.79	0.79
A. Thr(%)	0.68	0.68	0.68	0.69
A. Arg(%)	1.07	1.07	1.07	1.07

※ 試験区名については、BP(%)-ME(kcal/kg)を()内に併記した。

※ A. Lys, 有効リジン; A. Met, 有効メチオニン; A. Met+Cys, 有効メチオニン+シスチン; A. Thr, 有効スレオニン; A. Arg, 有効アルギニン

* ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; メナジオン 2.9mg/kg; ビタミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン 0.13mg; ピリドキシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨウ素 1.3mg

表 2-4-1d. 各試験飼料の組成および計算値

試験区名(BP-ME) 原料(%)	試験区 13 (121-3150)	試験区 14 (121-3200)	試験区 15 (121-3250)	試験区 16 (121-3300)
とうもろこし・中	62.90	61.65	60.38	59.12
とうもろこし・粉	3.00	3.00	3.00	3.00
大豆油かす (HP)	21.69	21.69	21.69	21.69
なたね油かす	3.02	3.24	3.46	3.68
魚粉 (65%)	4.00	4.00	4.00	4.00
Y.G. (27 度)	2.84	3.88	4.93	5.98
炭酸カルシウム (粉)	1.090	1.090	1.090	1.080
リン酸カルシウム(トリカホス)	0.530	0.530	0.530	0.530
食塩	0.200	0.200	0.200	0.200
L-リジン (98.5%)	0.210	0.210	0.200	0.200
DL-メチオニン (99%)	0.260	0.260	0.260	0.260
L-スレオニン (98.5%)	0.040	0.040	0.050	0.050
塩化コリン	0.010	0.010	0.010	0.010
フィターゼ	0.100	0.100	0.100	0.100
ビタミンミネラルブレックス*	0.100	0.100	0.100	0.100
粗蛋白質(%)	19.60	19.60	19.60	19.50
粗脂肪(%)	5.90	6.90	7.90	8.80
粗繊維(%)	1.80	1.80	1.80	1.80
粗灰分(%)	5.10	5.10	5.10	5.10
ME(kcal/kg)	3,150	3,200	3,250	3,300
カルシウム(%)	0.90	0.90	0.90	0.90
総リン(%)	0.54	0.54	0.54	0.54
有効リン(%)	0.30	0.30	0.30	0.30
A. Lys(%)	1.13	1.13	1.13	1.13
A. Met(%)	0.56	0.56	0.56	0.56
A. TSAA(%)	0.83	0.83	0.83	0.83
A. Thr(%)	0.72	0.72	0.73	0.73
A. Arg(%)	1.14	1.14	1.14	1.14

※ 試験区名については、BP(%)-ME(kcal/kg)を()内に併記した。

※ A. Lys, 有効リジン; A. Met, 有効メチオニン; A. Met+Cys, 有効メチオニン+シスチン; A. Thr, 有効スレオニン; A. Arg, 有効アルギニン

* ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; メナジオン 2.9mg/kg; ビタミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン 0.13mg; ピリドキシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨウ素 1.3mg

表2-4-2. バランスタンパク質(BP)水準およびME水準を強化した飼料をROSS308系ブロイラーに給与したときの各日齢における生体重および試験終了42日齢時点における育成率の比較^{*1}

試験区*2	BP (%)	ME (kcal/kg)	生体重, g/羽						育成率*3, % 42日齢時												
			21日齢		28日齢		35日齢			38日齢		42日齢									
試験区1	100	3150	1174	±	62	1873	±	125	2609	±	264	ab	2954	±	287	ab	3513	±	255	ab	90.9
試験区2	100	3200	1174	±	67	1908	±	118	2720	±	165	ac	3052	±	191	ac	3522	±	246	ab	100
試験区3	100	3250	1175	±	50	1860	±	107	2602	±	196	a	2934	±	226	a	3413	±	269	ab	100
試験区4	100	3300	1173	±	83	1898	±	133	2734	±	179	ac	3059	±	250	ac	3640	±	218	ab	95.5
試験区5	107	3150	1177	±	77	1910	±	154	2751	±	211	ac	3151	±	234	ac	3650	±	270	ab	95.5
試験区6	107	3200	1170	±	71	1912	±	143	2746	±	230	ac	3038	±	254	ac	3550	±	274	ab	100
試験区7	107	3250	1171	±	56	1931	±	126	2704	±	230	ac	3122	±	233	ac	3626	±	251	ab	95.5
試験区8	107	3300	1170	±	67	1902	±	124	2761	±	169	ac	3141	±	207	ac	3671	±	265	ab	86.4
試験区9	114	3150	1172	±	86	1895	±	163	2720	±	234	ac	3102	±	268	ac	3608	±	312	ab	100
試験区10	114	3200	1174	±	64	1897	±	104	2681	±	253	ac	3063	±	182	ac	3605	±	221	ab	90.9
試験区11	114	3250	1172	±	70	1958	±	127	2812	±	180	ac	3176	±	218	c	3714	±	269	ab	100
試験区12	114	3300	1171	±	53	1959	±	156	2844	±	179	bc	3235	±	225	bc	3801	±	235	b	86.4
試験区13	121	3150	1175	±	76	1939	±	204	2832	±	159	ac	3219	±	188	bc	3726	±	271	ab	90.9
試験区14	121	3200	1171	±	79	1957	±	108	2858	±	190	c	3230	±	206	c	3753	±	243	b	100
試験区15	121	3250	1176	±	81	1919	±	144	2689	±	298	ac	3057	±	364	ac	3575	±	504	ab	86.4
試験区16	121	3300	1170	±	83	1891	±	202	2759	±	313	ac	3127	±	393	ac	3600	±	552	ab	81.8

平均値±標準偏差, n = 22 ただし、斃死鶏あるいは淘汰鶏が出た場合、個体数は一部欠損

a-c 各日齢の試験区間において異なる肩文字を持つもの同士の間には有意差あり(P < 0.05)

*1 チェンキーマニエアル2009年度版の栄養成分表のフィニッシャー2に記載された有効アミノ酸(AA)水準を基準に有効ジンのみ5%強化したバランスタンパク質(BP)をBP100%とし、MEを3,150kcal/kgとした基準飼料を作出した(試験区1(100-3150))。試験区1を基に、BPを100%から121%まで7%刻みに4区間およびMEを3,150kcal/kgから3,300kcal/kgまで50kcal/kg刻みに4区間の水準で設定し、BP4段階 x ME4段階の飼料を作出し、21日齢時よりブロイラーに給与した。

*2 各々の試験区におけるBPおよびMEの水準は表内に示した通り

*3 育成率は斃死および各日齢での体測時においてスミルプの棄却検定により危険率5%で除外された際に淘汰した鶏を含む

表2-4-3. バランスタンパク質(BP)水準およびME水準を強化した飼料をROSS308系ブロイラーに給与したときの各日齢間における生産成績^{*1}

試験区 ^{*2}	100				107				114				121		
	試験区1	試験区2	試験区3	試験区4	試験区5	試験区6	試験区7	試験区8	試験区9	試験区10	試験区11	試験区12	試験区13	試験区14	試験区15 試験区16
BP (%)	100				107				114				121		
ME (kcal/kg)	3150	3200	3250	3300	3150	3200	3250	3300	3150	3200	3250	3300	3150	3200	3300
増体重, g/羽															
21～28日齢	699	735	685	725	733	742	760	732	723	723	786	788	754	787	744
28～35日齢	736	811	742	836	841	834	772	859	825	785	855	885	903	901	769
35～38日齢	346	333	332	325	400	291	418	380	382	382	364	392	387	372	368
38～42日齢	559	470	479	581	498	512	504	530	506	542	538	566	507	523	518
21～38日齢	1780	1879	1759	1886	1974	1868	1951	1971	1930	1889	2005	2065	2044	2059	1881
21～42日齢	2339	2348	2238	2466	2473	2380	2455	2501	2436	2431	2542	2631	2551	2583	2400
飼料摂取量, g/羽															
21～28日齢	1180	1207	1131	1175	1167	1177	1207	1180	1191	1144	1184	1112	1121	1151	1119
28～35日齢	1435	1407	1285	1417	1527	1405	1389	1397	1401	1317	1400	1342	1371	1425	1237
35～38日齢	687	673	620	640	737	641	652	825	686	606	660	633	664	665	560
38～42日齢	950	910	884	950	1016	953	925	782	946	895	944	898	925	940	747
21～38日齢	3302	3288	3036	3232	3431	3224	3248	3403	3279	3067	3243	3087	3156	3241	2916
21～42日齢	4244	4198	3920	4196	4409	4177	4162	4146	4225	2972	4187	3982	4047	4181	3677
飼料要求率(FCR)															
21～28日齢	1.688	1.643	1.652	1.622	1.593	1.586	1.588	1.612	1.648	1.583	1.506	1.411	1.486	1.463	1.504
28～35日齢	1.951	1.735	1.732	1.694	1.815	1.684	1.798	1.627	1.698	1.679	1.638	1.517	1.519	1.582	1.609
35～38日齢	1.987	2.024	1.865	1.969	1.842	2.202	1.561	2.174	1.797	1.588	1.811	1.615	1.717	1.790	1.521
38～42日齢	1.699	1.938	1.845	1.637	2.037	1.861	1.835	1.474	1.869	1.651	1.756	1.587	1.823	1.796	1.442
21～38日齢	1.855	1.750	1.726	1.714	1.738	1.726	1.665	1.727	1.699	1.624	1.618	1.495	1.544	1.574	1.550
21～42日齢	1.814	1.788	1.752	1.701	1.783	1.755	1.695	1.657	1.734	1.634	1.647	1.514	1.587	1.619	1.532
各試験区の回復数は n = 1															
各週齢における体測で個体中が明らかに小さい個体も生体重のデータとして含む。ただし、体測時にスミルノの棄却検定により危険率5%で有意に小さかった個体は淘汰した															

*1 生産成績は各日齢における生体重ならびに、各日齢間(後期、仕上期および通期の試験期間)における増体重、飼料摂取量およびFCRとした

*2 チヤンキーマニユアル2009年度版の栄養成分表のフアイニツキヤー2に記載された有効アミノ酸(AA)水準を基準に有効アミノ酸のみ5%強化したバランスタンパク質(BP)を BP100%とし、MEを3,150kcal/kgとした基準飼料を作出した(試験区1(100-3150))。試験区1を基に、BPを100%から121%まで7%刻みに4区間およびMEを3,150kcal/kgから3,300kcal/kgまで50kcal/kg刻みに4区間の水準で設定し、BP4段階 x ME4段階の飼料を作出し、21日齢時よりブロイラーに給与した。試験区ごとに設定されたBP(%)およびME(kcal/kg)は試験区各の下段に表記した

(参 考)

生産成績の各指標における全 16 試験区間の平均値

全区間平均値 (index: 100)							
期間	体重(g)	期間	育成率	期間	増体重(g)	飼料摂取量(g)	FCR
21d	1172.8	21d-42d	93.5	21d-28d	739.8	1154.2	1.563
28d	1912.5			28d-35d	826.4	1376.6	1.671
35d	2738.9			35d-38d	364.9	660.0	1.820
38d	3103.8			38d-42d	519.2	905.6	1.750
42d	3623.0			21d-38d	1931.1	3190.9	1.655
				21d-42d	2450.3	4086.5	1.670

表2-4-4. 試験終了時における鶏肉・脂肪歩留り*1においてバランスタンパク質或いはMEの強化飼料*2が及ぼす影響

試験区名	試験区1(100-3150)	試験区4(121-3150)	試験区13(100-3300)	試験区16(121-3300)
下段：BP(%)・ME(kcal/kg)	BP100-ME3150	BP121-ME3200	AA100-ME3300	AA121-ME3300
処理前生体重*3 (g/羽)	3524 ± 73	3670 ± 63	3496 ± 30	3632 ± 149
組織重量	(g)			
大腿筋	281.8 ± 8.9	298.5 ± 29.5	277.0 ± 19.5	296.0 ± 15.4
浅胸筋	341.7 ± 20.0	378.3 ± 34.1	331.2 ± 13.7	345.5 ± 40.6
腹腔内脂肪	278.8 ± 55.8	247.5 ± 49.5	366.3 ± 73.3	307.8 ± 61.6
歩留まり	(%)			
大腿筋	8.0 ± 0.3	8.1 ± 0.9	7.9 ± 0.5	8.2 ± 0.5
浅胸筋	9.7 ± 0.4	10.3 ± 0.9	9.5 ± 0.3	9.5 ± 0.9
腹腔内脂肪	1.6 ± 0.3	1.4 ± 0.2	2.1 ± 0.3	1.7 ± 0.4
平均値±標準偏差, n = 5				

*1 鶏肉はモモ肉として大腿筋、ムネ肉として浅胸筋とし右側のみ採取。脂肪は腹腔内脂肪とした

*2 チヤンキー・マニユアル2009年度版の栄養成分表のフィニッシャー2に記載された有効アミノ酸(AA)水準を基準に有効リジンのみ5%強化したバランスタンパク質(BP)をBP100%とし、MEを3,150kcal/kgとした基準飼料を作出した(試験区1(100-3150))。基準飼料に対し、AA+21%強化およびもしくはME+150kcal/kg強化した飼料を給与した区(試験区4(121-3150)、試験区13(100-3300)および試験区16(121-3300))の歩留りを測定した

*3 歩留まり測定に供試した個体の重量を示した

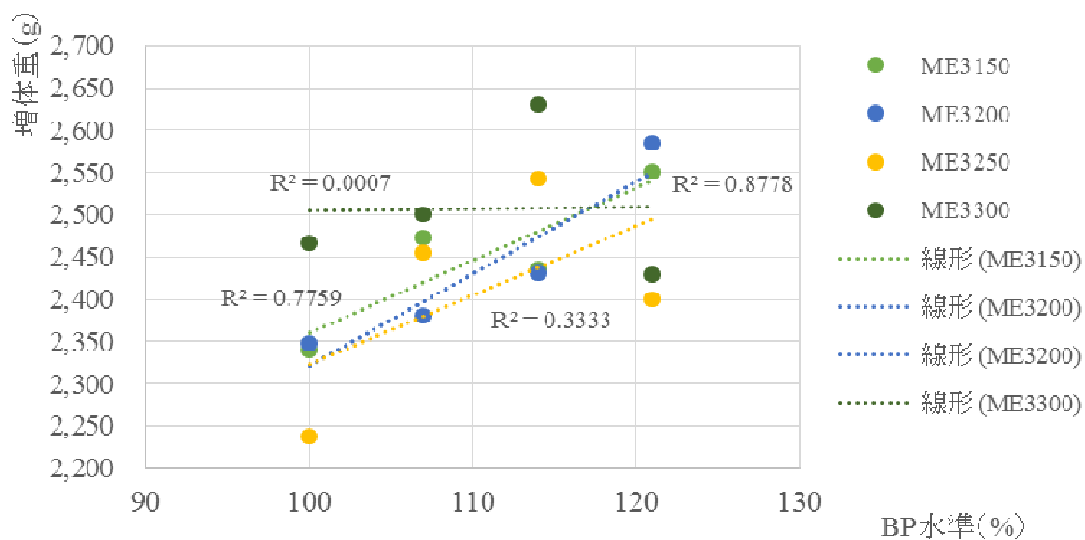


図 2-4-1a. 飼料中の BP 水準を x 軸とした時の各 ME 水準に対する
21～42 日 齢 の ブロイラー の 増 体 重 の 比 較

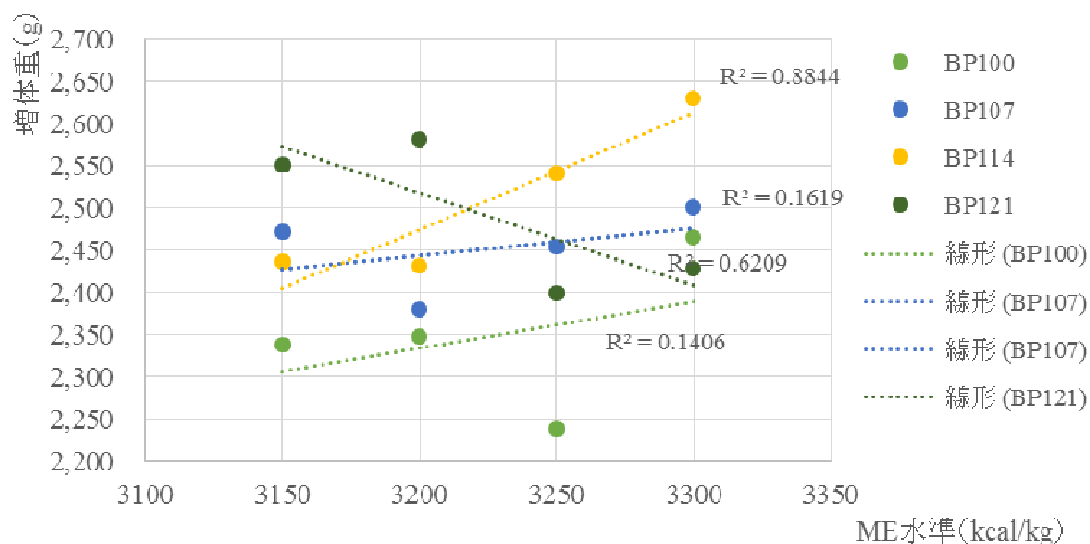


図 2-4-1b. 飼料中の ME 水準を x 軸とした時の各 BP 水準に対する
21～42 日 齢 の ブロイラー の 増 体 重 の 比 較

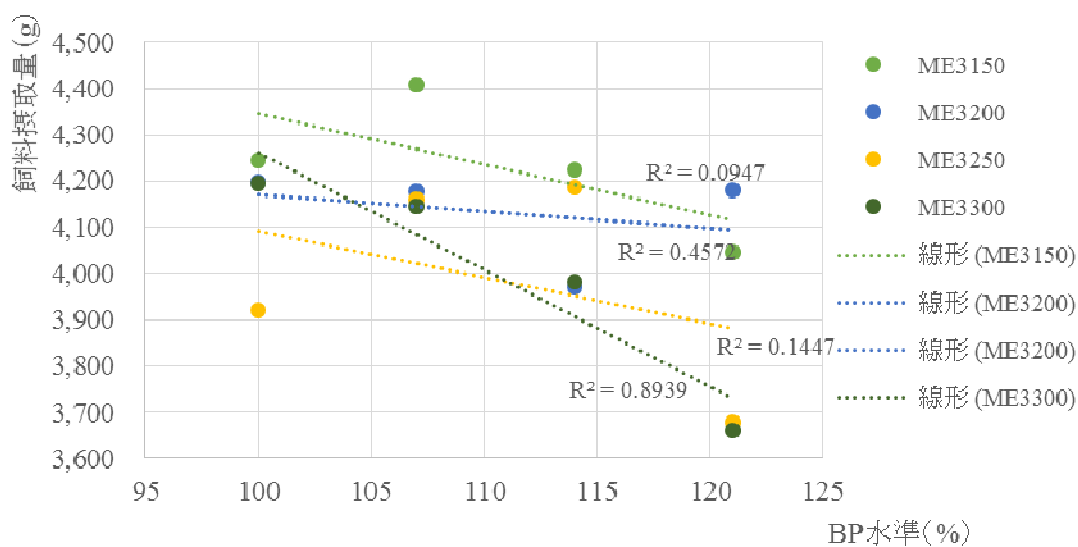


図 2-4-2a. 飼料中の BP 水準を x 軸とした時の各 ME 水準に対する
21～42 日 齢 の ブロイラー の 飼 料 摂 取 量 の 比 較

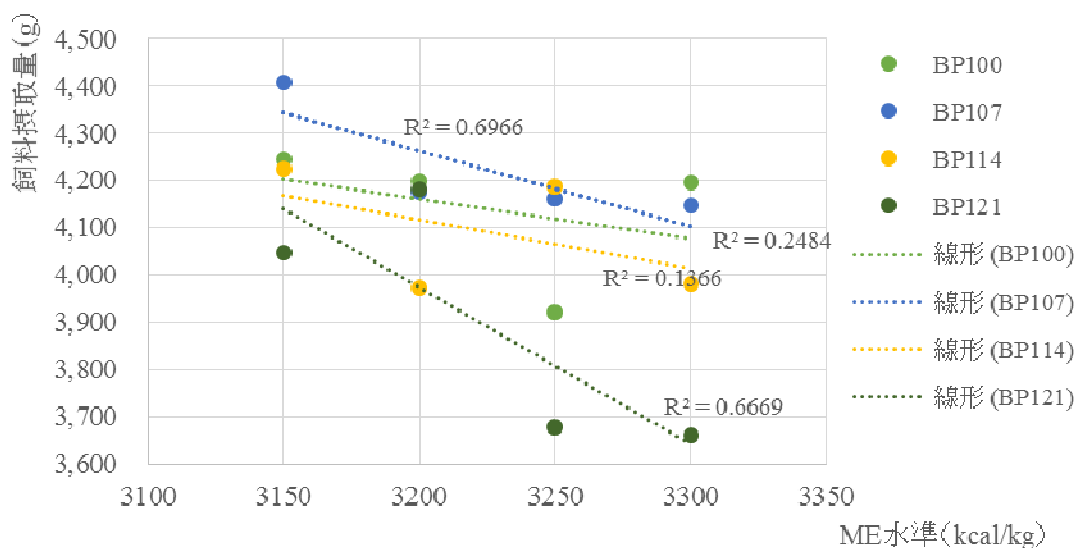


図 2-4-2b. 飼料中の BP 水準を x 軸とした時の各 ME 水準に対する
21～42 日 齢 の ブロイラー の 飼 料 摂 取 量 の 比 較

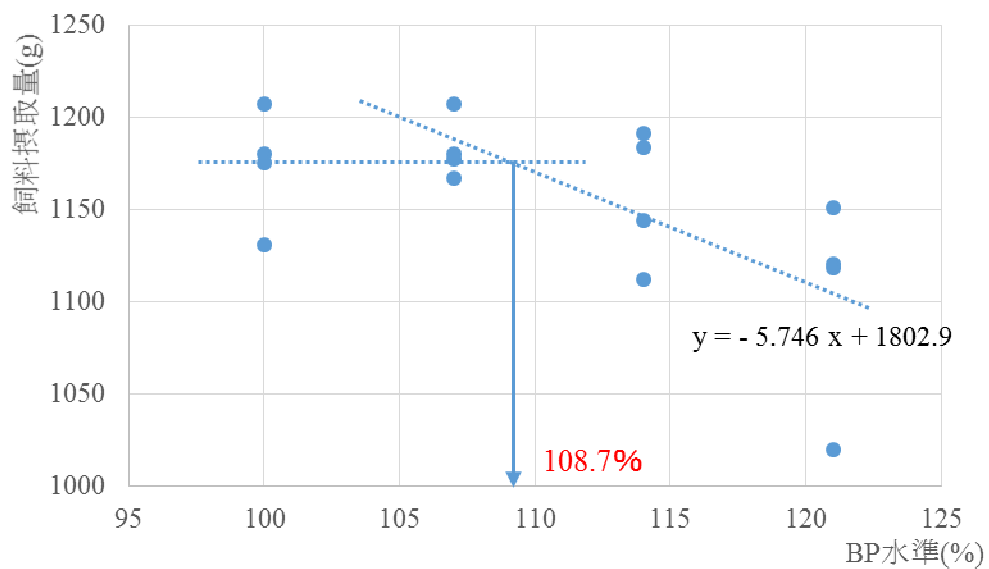


図 2-4-3a. 21～28 日 齢 に お け る 全 試 験 区 の BP 水 準 に 対 す る
ブ ロ イ ラ ー の 飼 料 摂 取 量 の 変 化 お よ び 折 れ 線 回 帰 グ ラ フ

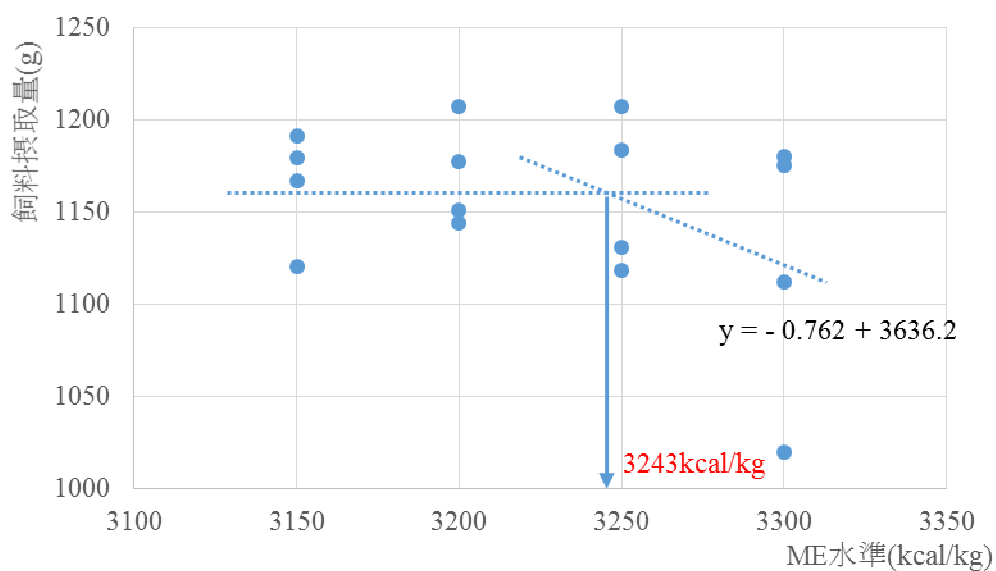


図 2-4-3b. 21～28 日 齢 に お け る 全 試 験 区 の ME 水 準 に 対 す る
ブ ロ イ ラ ー の 飼 料 摂 取 量 の 変 化 お よ び 折 れ 線 回 帰 グ ラ フ

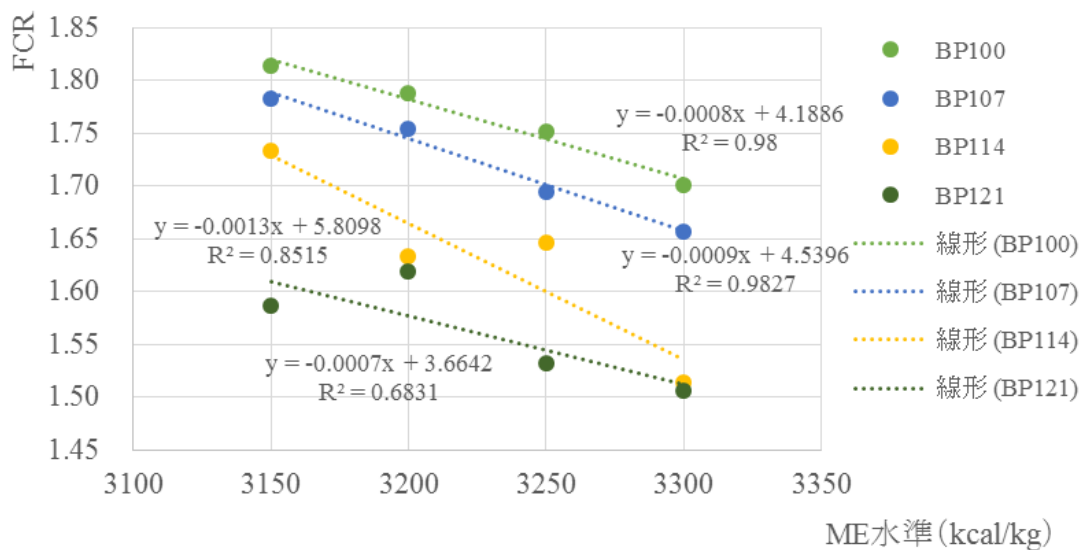


図 2-4-4a. 飼料中の BP 水準を x 軸とした時の各 ME 水準に対する
21～42 日 齢 の ブロイラー の FCR の 比較

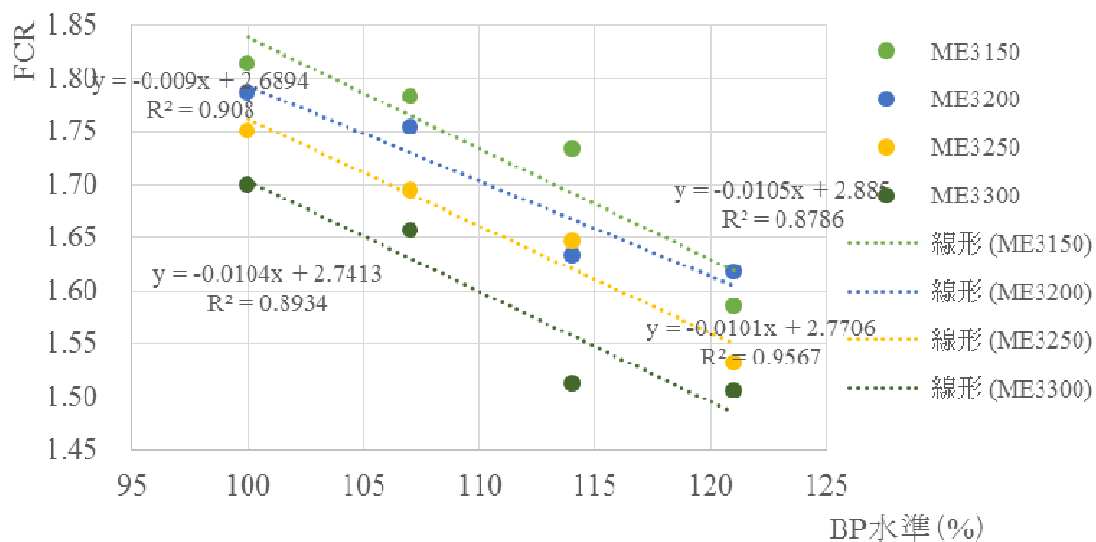


図 2-4-4b. 飼料中の ME 水準を x 軸とした時の各 BP 水準に対する
21～42 日 齢 の ブロイラー の FCR の 比較

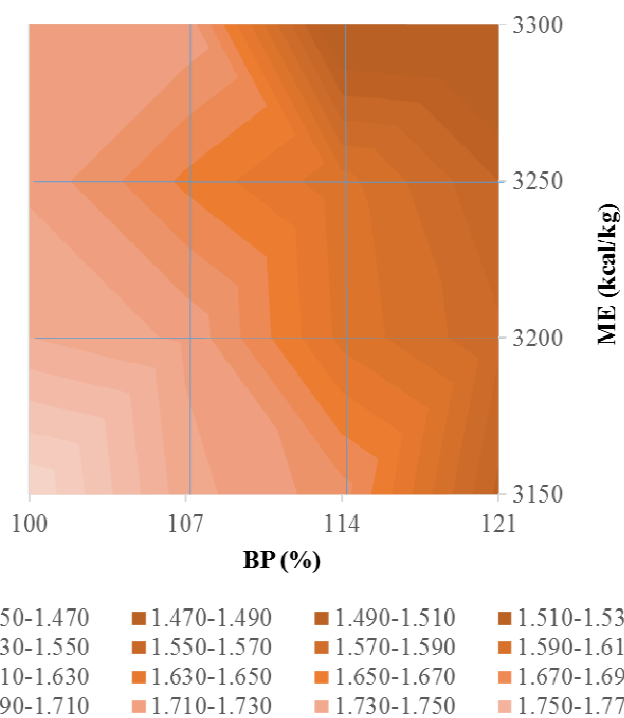


図 2-4-5a. 飼料中の BP 水準および ME 水準が 21～38 日 齢 における肥 育ブロイラーの FCR に及ぼす影響の推定

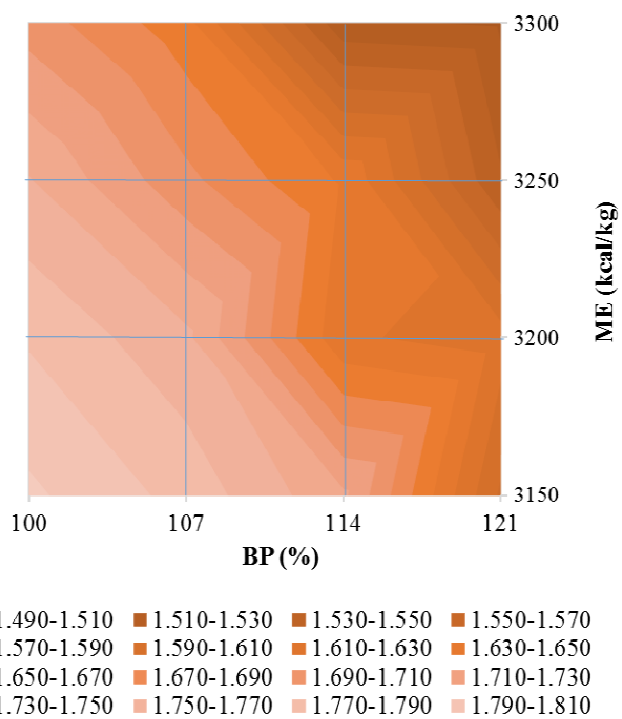


図 2-4-5b. 飼料中の BP 水準および ME 水準が 21～42 日 齢 における肥 育ブロイラーの FCR に及ぼす影響の推定

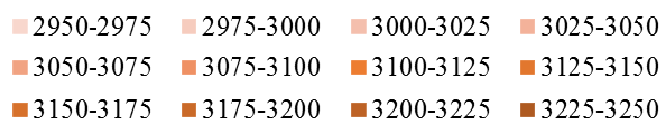
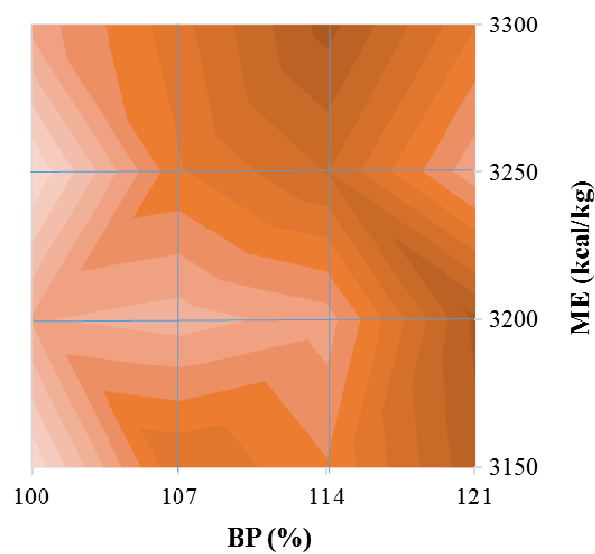


図 2-4-6a. 飼料中の BP 水準および ME 水準が 21～38 日 齢 における肥 育ブロイラーの増 体 重 に 及 ぼ す 影 響 の 推 定

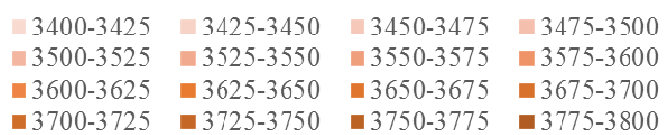
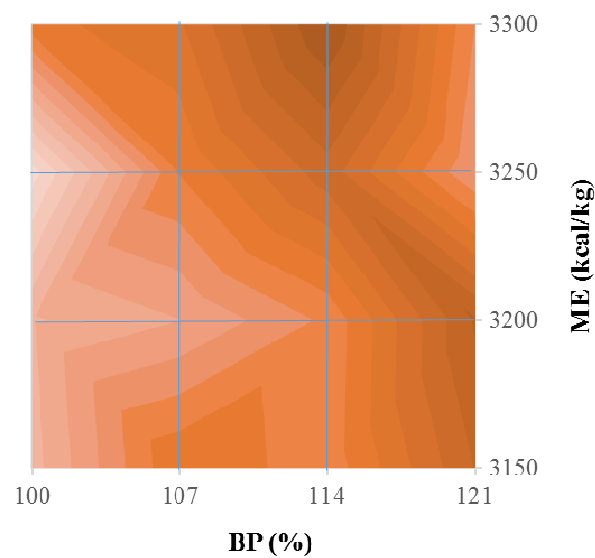


図 2-4-6b. 飼料中の BP 水準および ME 水準が 21～42 日 齢 における肥 育ブロイラーの増 体 重 に 及 ぼ す 影 響 の 推 定

第 3 章

ブロイラー配合飼料における リジン強化に関する検討

第 1 節

リジンおよび含硫アミノ酸含量の強化が FCR に及ぼす影響

1. 緒言

第 2 章では、配合飼料中の栄養組成として ME および CP について着目し、肥育後期のブロイラーに対する給与試験を実施し、増体性能や飼料要求率に関する検討を行った。その結果、FCR は ME よりもバランスアミノ酸を伴ったタンパク質、すなわちバランスタンパク質（BP）に強く反応することが示唆された。したがって、FCR の改善のためには配合飼料中の BP 強化が有効であるが、穀物等の各原料を組み合わせて作られる配合飼料では、その設計上 BP を強化すると結果的に不要な窒素源も増加し、CP も高まることが一般的である。過剰なタンパク質やアミノ酸は最終的に窒素として排泄しないとならない余分な栄養素といえるため、適切に削減することが望ましい。

タンパク質は、20 種類の標準アミノ酸と特殊な合成機構で組み込まれるセリノシステインおよびピロリシンの 2 種類を加えた 22 種類で構成されているが、そのうちの約半分は生物が自身の体内で合成することができるため必ずしも飼料から摂取する必要はない。このようなアミノ酸を可欠アミノ酸（非必須アミノ酸）という。一方、体内で合成できないアミノ酸や合成できても必要量として不足しやすいアミノ酸が存在し、飼料中に必須であるとの意味からこれらは必須アミノ酸（不可欠アミノ酸）と呼ばれている。鶏における必須アミノ酸はアルギニン（Arg）、メチオニン（Met）、フェニルアラニン（Phe）、リジン（Lys）、ヒスチジン（His）、スレオニン（Thr）、イソロイシン（Ile）、ロイシン（Leu）、バリン（Val）およびトリプトファン（Trp）の 10 種類とされ、グリシン（Gly）あるいはセリン（Ser）、およびプロリン（Pro）も最大生産のために必要であるとされる（家禽学，朝倉書店）。必須アミノ酸は鶏の要求量を満たすように飼料中に供給し、充足させる必要があり、各種栄養指標においてアミノ酸の推奨量が設定されている（表 2-1-1）。第 2 章において ROSS308 に対し、その種鶏メーカーである Aviagen 社の推奨マニュアル値を基準に BP を強化した飼料を給与したところ、FCR が改善される結果を得た。この結果は当該マニュアルの推奨

値では現代のブロイラーの栄養要求量を満たせていない可能性を示唆している。ただし、前章における試験ではマニュアルに掲載された必須アミノ酸の設計値をアミノ酸のバランスを維持したまま引き上げたが、必ずしもすべての必須アミノ酸の要求量がマニュアル以上に求められるわけではないものと考えられ、どの栄養素が不足しているのかについては憶測によるところとなる。

ブロイラー飼料は各生育時期による栄養成分の要求量を参考にして、必要とする必須アミノ酸を十分含むように設計されるが、一般にはとうもろこし-大豆油かす主体の配合飼料では Lys あるいは含硫アミノ酸（メチオニン+シスチン, Met+Cys, TSAA）が第一制限アミノ酸になる例が多い。そのため、不足分は結晶アミノ酸を添加物として飼料中に添加することで充足するように設計される。結晶 Lys や結晶 Met は古くから工業的に供給されており、どちらに関する研究も長年に渡って行われている。各アミノ酸の要求量を求めるに当たっては、アミノ酸インバランス、拮抗作用およびタンパク質・アミノ酸の水準といった相互関係を含めた栄養を考える必要があるが、特に Lys や TSAA は第一制限アミノ酸のため、BP に与える影響は大きいものと考えられる。そのため、要求量を決める際においても優先順位が高くなる。したがって、本章第 1 節では、現代のブロイラーの最大成長させることにおいて、第一制限アミノ酸とされる Lys と TSAA のみが不足している可能性を鑑み、結晶アミノ酸を用いて、2 つのアミノ酸の強化が肥育後期のブロイラーの FCR に及ぼす影響についてスクリーニング的に検討した。

2. 材料および方法

(1) 供試鶏

ROSS308（UK 産チャンキー）のオスの初生ヒナを株式会社森孵卵場より 700 羽購入し、日本農産工業株式会社畜産技術センターのウインドウレス鶏舎（ペン室）にて、市販飼料「ジョイスタークランプル（CP22%, ME3,050kcal/kg）」のクランプル飼料を用いて 8 日齢まで飼育し、8 日齢時にて体重の近い個体 550 羽を選抜し、平均体重が概ね揃うように、22 の飼育ペンに 25 羽ずつ割り当てた。さらに 21 日齢まで CP20.0%、ME3,100kcal/kg のマッシュ飼料を用いて馴致した。21 日齢にて成長不良の個体もしくは群内において平均体重から遠い個体を頸椎脱臼による淘汰を実施し、各群 22 羽ずつ選抜した。ただし、本試験に

は 4 群のみ割り当て、残りの 18 群は別試験に供試した。舎内温度等の環境条件については ROSS308 Management Handbook (Aviagen) に準じて調整を図った。

(2) 試験区

本試験では、チャンキーマニュアル (CHM) 2009 年度版のフィニッシャー 2 (F2) である有効アミノ酸水準を基準とした設計を BP100% とし、ME3,200kcal/kg とした飼料を基準飼料 (陰性対照区) とした。また、BP110% とした飼料給与群を陽性対照区とした。さらに、基準飼料に対し、有効 Met+Cys (TSAA) および有効 Lys を各々 10% 強化した飼料を給与する試験区を設けた。これらの試験区に対応した試験飼料は、第 2 章第 1 節 2(1) で示した飼料システム (日本農産工業(株), 神奈川県横浜市) を用いて LP 計算した結果得られた配合率を基に作製した。これらの内容を整理すると以下の通り。各試験飼料の詳細は表 3-1-1 に示した。

陰性対照区：基礎飼料 (CP17.5%・ME3,200kcal/kg)

有効アミノ酸 100% (有効 Lys 0.89%、有効 TSAA 0.69%)

陽性対照区：CP19.0%・ME3,200kcal/kg

有効アミノ酸 110% (有効 Lys 0.98%、有効 TSAA 0.76%)

TSAA 強化区：CP17.5%・ME3,200kcal/kg

有効アミノ酸 100% (有効 Lys 0.89%、有効 TSAA 0.76%)

Lys 強化区：CP17.5%・ME3,200kcal/kg

有効アミノ酸 100% (有効 Lys 0.98%、有効 TSAA 0.69%)

※シスチン (Cys) は生体内においてメチオニン (Met) から合成されることから、Met および Cys の栄養要求量は Met+Cys = TSAA として、その要求量について検討することとした。

(3) 測定項目および統計処理

21, 24, 28, 31, 35, および 38 日齢の体重を測定し、21~38 日齢における増体重、飼料摂取量および FCR を算出した。試験に供試した鶏はすべて株式会社染谷食鳥 (茨城県) に適切に出荷した。本節の試験は試験飼料が FCR 及ぼす影響の傾向を概観することが目的であったため各試験区の反復数は n=1 とした。そのため、各日齢における体重を除き統計処理することができなかった。なお、

体重測定を実施他各日齢において、個体重が明らかに小さかった個体についても群の平均体重に算入したが、スミルノフの棄却検定を行い、危険率 5% で有意と判定された個体については淘汰し、次の期間では斃死鶏扱いとした。これは各期間における飼料摂取量や FCR への影響を極力小さくするための処置である。また、各日齢における体重は、統計ソフト R version 3.5.1 (Windows 版) を用い、Rcmdr を使用して Tukey の多重比較検定を行った。

3. 結果

各試験区の体重の推移を図 3-1-1a、試験終了時 (38 日齢) に着目した体重の比較を図 3-1-1b、21~38 日齢における増体重、飼料摂取量および FCR の結果を表 3-1-2 に示した。

反復数 1 の試験であるため、体重のみ分散分析を行ったところ各日齢において有意差は認められなかった ($P > 0.05$)。ただし、38 日齢体重において陰性対照区 (2,836g) と比較し陽性対照区で 2,936g、Lys 強化区で 2,948g と増加する傾向が見られた。なお、TSAA 区は 2,854g と体重増加の傾向は見られなかった。その他の指標については反復数 $n=1$ のため参考数値となるが、飼料摂取量は陰性対照区と比較しその他の区で若干増加する傾向が見られた。その結果、FCR は陽性対照区が 1.657 と一番優れ、Lys 強化区 1.686、陰性対照区 1.725、TSAA 強化区 1.749 と続いた。

4. 考察

本節では肥育後期のブロイラーにおいて第一制限アミノ酸とされる Lys と TSAA について、飼料中に各々有効値水準で 10% 強化しスクリーニング的に給与試験を実施した。

その結果、反復数 $n=1$ の試験であるものの、増体重において Lys 強化区は陽性対照区と遜色ない成績となった。Lys は通常筋肉組織細胞に集中しており、体を構成するタンパク質合成アミノ酸でも様々な役割をもつ重要なアミノ酸の一つとされる。それゆえに Lys に関する研究は数多く行われている。生産性能に対する Lys 要求量も求められており、たとえば Han と Baker (1994) は、22~43 日齢における可消化リジンの要求量を増体重の最大化のためにはオスで

0.85%、メスで 0.78%とし、最適な FCR のためには同様にオスで 0.89%、メスで 0.85%であったことを報告している。また、Labadan ら（2001）は、3～6 週齢においてムネ肉の成長を促す Lys 含量は 0.99%であり可消化 Lys では 0.92%と推定している。本節の試験において陰性対照区の Lys 含量は有効（≡可消化）レベルで 0.89%であり、陽性対照区および Lys 強化区で 0.98%であった。有意差こそ認められなかったものの試験終了時体重において陽性対照区および Lys 強化区で優れる傾向が見られたことから、Han と Baker や Labadan らが試験した時代と比較して、より現代のブロイラーは Lys の要求量が増加している可能性が示唆された。

一方、TSAA 強化区の生産成績は増体重、飼料摂取量および FCR において陰性対照区とほぼ変わらない結果となったことから、飼料中の TSAA の強化は増体性能改善においてその効果は大きくなく、さらに CHM2009 の F2 とした陰性対照の有効アミノ酸水準においては少なくとも TSAA が欠乏状態にはないものと示唆される。TSAA も Lys 同様に体タンパク質を構成するだけでなく様々な代謝に関わる重要なアミノ酸の一つとして古くから研究が行われている。特に TSAA と他のアミノ酸の関係や TSAA としての Met および Cys の相互関係、ならびに Met のもつ毒性等による過剰障害などについては数多くなされてきた（太田, 1999）。そのうち、肥育後期の TSAA の要求量推定に関わる試験の一つとして、Koide ら（1993）は加齢に伴い TSAA の要求量が減少することを報告している。また、Met の要求量は加齢に伴い一定の割合で減少するのに対し、Cys の要求量は 0～3 週齢では Met より要求量が高いが、それから 3～6 週齢までは Met と同様の傾向で減少する。この要因としては、Cys は羽毛を構成するケラチンに多く含まれ、特に 0～3 週齢時は孵化時からのヒナの産毛から羽毛への生え代わりが起こることがその大きな原因と考えられている（Wheeler KB と Latshaw JD, 1981）。本節の試験目的は肥育後期における生産指標の改善をターゲットとしていたが、換羽時期前から開始した試験ではあるものの、体重、飼料摂取量および FCR といった生産指標に対する TSAA 要求量としては概ね充足している可能性が示唆された。なお、飼料添加物としての結晶 Met は適度に過剰な量を添加することでブロイラーの腹腔内脂肪を低減させる効果があるとの報告がある（Jensen ら, 1989; Takahashi ら, 1994）。これは飼料摂取量への影響のみでなく、肝臓での脂肪合成および分解に対する影響によることが明らかにされている（Takahashi と Akiba, 1995）。本試験では歩留りの測定を行わなかつ

たため定かではないが、鶏の屠体成績についても検討する必要があるかもしれない。

以上の通り、飼料中の有効 TSAA 強化による肥育後期ブロイラーの生産性改善の傾向は見られなかったが、有効 Lys 強化による増体性能や FCR の改善傾向は見受けられた。したがって、飼料中の有効 Lys 含量の強化は肥育後期における現代のブロイラーにとって FCR を改善する有効な手段となり得る可能性がある。本試験結果から第一制限アミノ酸が Lys と TSAA のどちらであるかとの点について議論するにはデータ数が少なく、試験の調査深度が浅いため結論付けられないが、Lys 強化飼料の給与により肥育後期のブロイラーの FCR において反応が大きい傾向が得られたことから、次節では飼料中の Lys 含量を段階的に強化し、至適な有効 Lys 要求量について検討することとした。

表 3-1-1. 各試験飼料の組成および計算値

原料 (%)	陰性対照区	陽性対照区	TSAA 強化区	Lys 強化区
とうもろこし・中	64.14	60.00	64.21	64.34
とうもろこし・粉	3.00	3.00	3.00	3.00
大豆油かす (HP)	11.90	15.57	11.81	11.64
なたね油かす	10.00	10.00	10.00	10.00
魚粉 (65%)	4.40	4.40	4.40	4.40
Y.G. (27 度)	4.46	4.495	4.42	4.41
炭酸カルシウム (粉)	1.140	1.130	1.140	1.140
リン酸カルシウム(トリカホス)	0.360	0.330	0.360	0.360
食塩	0.160	0.160	0.160	0.160
L-リジン (98.5%)	0.080	0.080	0.080	0.200
DL-メチオニン (99%)	0.150	0.180	0.220	0.150
フィターゼ	0.100	0.100	0.100	0.100
ビタミンミネラルプレミックス*	0.100	0.100	0.100	0.100
粗蛋白質 (%)	17.50	19.00	17.00	17.00
粗脂肪 (%)	7.10	7.50	8.20	9.20
粗繊維 (%)	2.40	2.50	2.10	2.10
粗灰分 (%)	4.80	5.00	4.90	4.90
ME(kcal/kg)	3,200	3,200	3,250	3,300
カルシウム (%)	0.90	0.90	0.90	0.90
総リン (%)	0.56	0.57	0.55	0.55
有効リン (%)	0.30	0.30	0.30	0.30
A. Lys (%)	0.89	0.98	0.98	0.89
A. Met (%)	0.44	0.48	0.44	0.51
A. TSAA (%)	0.69	0.76	0.69	0.76
A. Thr (%)	0.61	0.67	0.61	0.61
A. Arg (%)	0.96	1.06	0.95	0.95

※ A. Lys, 有効リジン; A. Met, 有効メチオニン; A. TSAA, 有効メチオニン+シスチン;
A. Thr, 有効スレオニン; A. Arg, 有効アルギニン

* ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; メナジオン 2.9mg/kg; ビ
タミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン
0.13mg; ピリドキシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg;
ヨウ素 1.3mg

表3-1-2. 21～38日齢のブロイラーの生産成績における有効アミノ酸、有効メチオニン＋シスチンおよび有効リジンの強化による影響*

試験区	陰性対照区	陽性対照区	TSAA強化区	Lys強化区
試験開始体重 (g/羽)	982.8	984.1	1004.6	1005.3
増体重 (g/羽)	1853.5	1951.8	1849.4	1942.9
飼料摂取量 (g/羽)	3197.6	3233.6	3234.1	3276.2
FCR	1.725	1.657	1.749	1.686

反復数n=1

TSAA, メチオニン＋シスチン; Lys, リジン

* 陰性対照区に対し、陽性対照区は有効アミノ酸（リジン、メチオニン、メチオニン＋シスチン、スレオニン、アルギニン、バリン、イソロイシンおよびトリプトファン）を10%強化した; TSAA強化区はメチオニン＋シスチンを10%強化した; Lys強化区は有効リジンを10%強化した

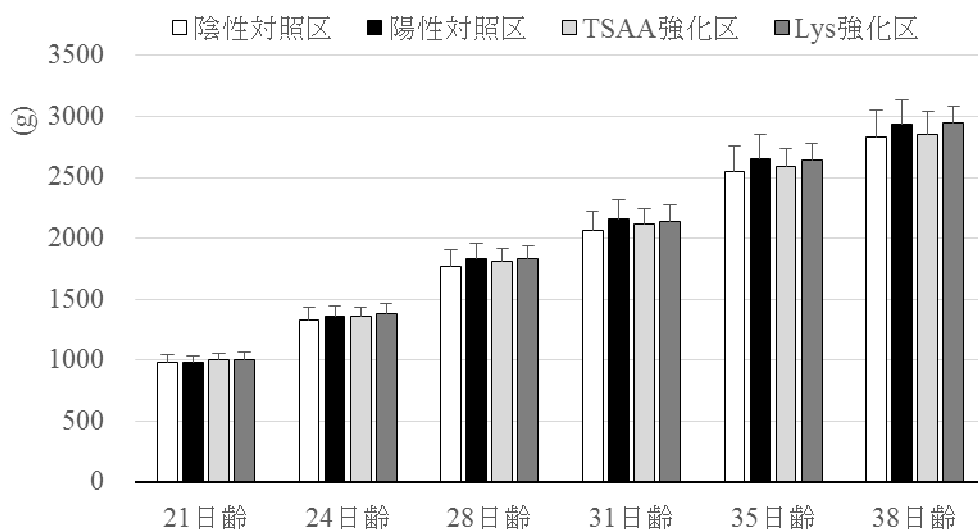


図 3-1-1a. 肥育後期のブロイラーに各試験飼料を給与したときの体重の推移および試験区間の比較

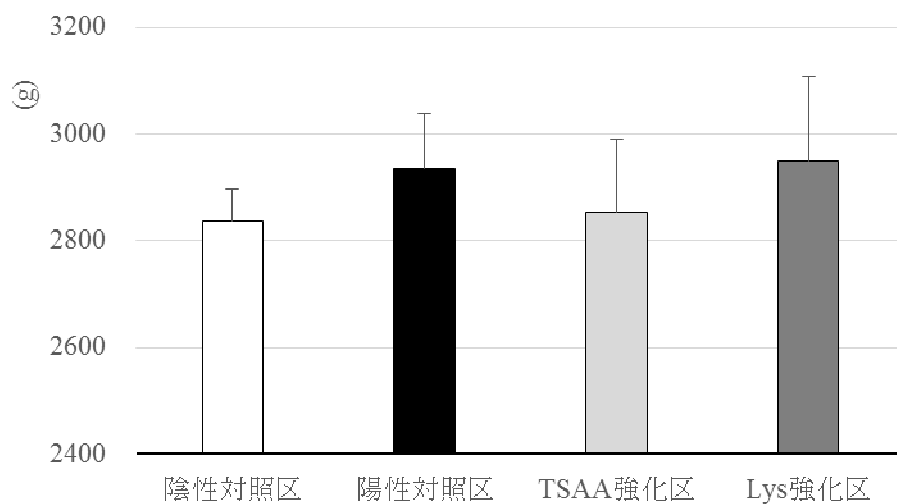


図 3-1-1b. 肥育後期のブロイラーに各試験飼料を給与したときの試験終了 38 日齢時における体重の比較

※ 平均値±標準偏差 (n=22)

※ TSAA, メチオニン+シスチン; Lys, リジン

第 2 節

リジン含量の段階的強化が FCR に及ぼす影響

1. 緒言

本論第 2 章では、現代の肥育後期におけるブロイラーの FCR にとって有効アミノ酸がその改善に大きく寄与する可能性を示した。同章での試験は Aviagen 社の ROSS308 ラインを供試鶏としたため、同ラインのマニュアルを基準とした有効アミノ酸バランスを用いて適正水準の探索を行ったが、非常に速いスピードで育種改良されていく現代の高増体ブロイラーにとって、必ずしも種鶏メーカーの提唱するマニュアルのアミノ酸組成が最適であるとは言い切れない。そこで本章第 1 節では、鶏において第一制限アミノ酸とされるリジン (Lys) と含硫アミノ酸 (TSAA) を飼料中に強化し、FCR の変化について概観した。その結果、有効 TSAA の強化では反応が見られなかったが、有効 Lys の強化では FCR に改善傾向が見られた。

近年の育種改良によってブロイラーの産肉能力は右肩上がり向上しており、体を構成する成分としてもアミノ酸の要求量は増加しているものと考えられている (ROSS An Aviagen Brand Web.)。さらにとうもろこし-大豆油かす主体の配合飼料において Lys は制限アミノ酸になりやすく、TSAA と並び第一制限アミノ酸とされるが、必須アミノ酸の中でも Lys は筋肉中に最も多く含有するアミノ酸であり (動物栄養学, 朝倉書店)、産肉面の観点からも不足しやすいアミノ酸である可能性がある。Lys に関する試験の一つとして、Sterling ら (2004) は、2 種類の CP 含量の飼料 (CP17%および CP23%) に対し、各々 3 段階となるよう Lys 水準を強化して 17 日齢から 42 日齢までブロイラーに給与したところ、CP 含量にかかわらず増体重の増加による FCR の改善が見られたことを報告している。本報告ではアミノ酸組成が明示されていなかったが、それらの結果からも現代のブロイラーにおける Lys の要求量は高まっている可能性が推察される。そこで、本試験では肥育後期のブロイラーに対し、飼料中の有効 Lys 水準を段階的に強化した飼料を給与する試験、すなわち Lys の用量反応性試験を実施し、生産成績に及ぼす影響を検証した。

2. 材料および方法

(1) 供試鶏

ROSS308 (UK 産チャンキー) のオスの初生ヒナを株式会社森孵卵場より 550 羽購入し、日本農産工業株式会社畜産技術センターのウインドウレス鶏舎 (ペン室) にて、CP22%, ME3,050kcal/kg のクランブル飼料を用いて 9 日齢まで、CP20%, ME3,050kcal/kg のマッシュ飼料にて 19 日齢まで馴致後、体重の近い個体 200 羽を選抜した。選抜した 19 日齢時のヒナは平均体重が概ね揃うように、5 試験区に対し各々 10 羽 4 反復に振り分けて試験に供した。舎内温度等の環境条件については ROSS308 Management Handbook (Aviagen) に準じ、調整を図った。

(2) 試験区

本試験では、19~35 日齢を後期、35~42 日齢を仕上期とし、飼料中の ME 水準を各々 3,150kcal/kg、3,300kcal/kg とした。試験飼料の有効アミノ酸はチャンキーマニュアル 2009 年度版 (CHM2009) のフィニッシャー 2 である有効アミノ酸水準を基準とし、そのうち有効 Lys のみ 5~20% まで 5% ずつ段階的に引き上げた設計を行った。配合率の作成には、第 2 章第 1 節 2(1) で示した飼料システム (日本農産工業(株), 神奈川県横浜市) を用いて LP 計算したが、CHM2009 に記載されている有効 Lys 以外のアミノ酸が試験に影響を与えることを極力避けるため、メチオニン、メチオニン+シスチン、スレオニンならびにアルギニンの設計値は CHM2009 を満たしかつ各区の水準が同等になるように調整した。この調整においては主に植物質性タンパク質原料によって栄養成分を調整した (CP は後期および仕上期共に各区 18.2% となるように設計)。これらの内容を整理すると以下の通り。各試験飼料の詳細は表 3-2-1a および表 3-2-1b に示した。

対照区：有効 Lys 0.890%

後期, CP18.2%・ME3,150kcal/kg・仕上期, CP18.2%・ME3,300kcal/kg

Lys5%強化区：有効 Lys 0.935%

後期, CP18.2%・ME3,150kcal/kg・仕上期, CP18.2%・ME3,300kcal/kg

Lys10%強化区：有効 Lys 0.979%

後期, CP18.2%・ME3,150kcal/kg・仕上期, CP18.2%・ME3,300kcal/kg

Lys15%強化区：有効 Lys 1.024%

後期, CP18.2%・ME3,150kcal/kg・仕上期, CP18.2%・ME3,300kcal/kg

Lys20%強化区：有効 Lys 1.068%

後期, CP18.2%・ME3,150kcal/kg・仕上期, CP18.2%・ME3,300kcal/kg

(3) 測定項目および統計処理

19, 28, 35, および 42 日齢の体重を測定し、19～42 日齢における増体重、飼料摂取量および FCR を算出した。また、試験終了時 42 日齢における各試験区の鶏肉・脂肪歩留まり（大腿筋、浅胸筋および腹腔内脂肪）を測定した。鶏の処理方法および歩留まり測定の方法については第 2 章第 1 節で示した方法に準じた。なお、歩留まり測定に供試した個体を除き、試験に供試した鶏は株式会社染谷食鳥（茨城県）に適切に出荷した。また、体重測定を実施他各日齢において、個体重が明らかに小さかった個体についても群の平均体重に算入したが、スミルノフの棄却検定を行い、危険率 5% で有意と判定された個体については淘汰し、次の期間では斃死鶏扱いとした。これは各期間における飼料摂取量や FCR への影響を極力小さくするための処置である。また、各日齢における体重は、統計ソフト R version 3.5.1 (Windows 版) を用い、R コマンドー (Rcmdr) を使用して Tukey の多重比較検定を行った。

3. 結果

試験開始後の各日齢における体重を表 3-2-3 に、日齢間の増体重、飼料摂取量および FCR を表 3-2-4 に示した。

試験終了の 42 日齢時の体重および各日齢間における増体重において各試験区間で有意な差は認められなかったが、19～42 日齢の増体重において対照区と比較し有効 Lys を強化した区で優れる傾向が見られた。飼料摂取量は 19～28 日齢時において対照区と比較して Lys10%強化区で増加したが ($P<0.05$)、その他の区間においては概ね同等となった。また、試験期間を通した 19～42 日齢の飼料摂取量において各試験区間に増減する傾向は見られなかった。一方、FCR は 19～28 日齢において有効 Lys を 10% 以上強化した区において優れる傾向が見られた。また、19～42 日齢時の FCR において各試験区の間には有意な差は認められなかったが、対照区に対し、Lys10%強化区 ($P=0.072$)、Lys15%強化区

($P=0.082$) と有効 Lys の強化により改善する傾向が見られた。

試験終了時の鶏肉・脂肪歩留まりを表 3-2-5 に示した。有効 Lys の強化に伴い浅胸筋の歩留まりが増加する傾向が見られ、対照区 (8.5%) に対し Lys20% 強化区 (9.7%) において有意に改善した ($P<0.05$)。一方、大腿筋の歩留まりにおいて有意差は確認できなかったものの、対照区に対し有効 Lys を強化するにしたがい、若干増加する傾向が見られた。

4. 考察

前節において、飼料中の有効 Lys 水準を対照区に対し 10% 増強した結果、FCR が改善する傾向が見られた。しかしながら、第 1 節における試験は反復数が $n=1$ であったことから、本節ではこの結果について再検証するため、反復数を増やし、さらに段階的に有効 Lys 水準を高めてブロイラーの生産成績、とりわけ FCR への影響について調査した。

その結果、FCR は有効 Lys の強化により改善する傾向が見られた。この傾向は Razaei ら (2004) の報告と支持する結果であった。同報告の試験では、飼料中の Lys 含量について塩酸 Lys を用いて 1.5g/kg および 3.0g/kg 強化しており、本節で示した試験と比較すると各々 Lys10% 強化区程度および Lys20% 強化区を少し超えた水準に相当する。Rezaei らのグループも飼料中の Lys 含量の増強に伴い増体重および飼料摂取量が増加する傾向にあり、結果として FCR は対照区に対し、塩酸 Lys 1.5g/kg 添加区および 3.0g/kg 添加区で共に有意に改善していた ($P<0.05$)。本節の試験でも、対照区に対して 10% 以上の有効 Lys 強化区で FCR が改善する傾向にあったことから、CHM2009 のフィニッシャー 2 の有効 Lys 推奨値 (0.89%) では、現代の ROSS308 系ブロイラーの最適 Lys 要求量を充足できていない可能性が示唆された。なお、Lys20% 強化区の FCR が若干悪化しているように見受けられたが、35 日齢前後で 2 羽の脚弱個体が発生しており明らかな増体不良が見られた。他の区と比較して標準偏差が大きいことからこれらの個体が影響したものと推察される (仮に棄却検定を実施した場合、 1.709 ± 0.044)。本試験では各区 10 羽 \times 4 反復としたが試験に用いる動物の数についても再考が必要かもしれない。

鶏肉・脂肪歩留まりにおいては、浅胸筋の重量および歩留まりが改善する傾向にあった。このムネ肉歩留まりを改善した結果は、先述の Rezaei ら (2004)

の報告と同様であった。同筆者らは飼料中の Lys 濃度がムネ肉の収量に大きな影響を及ぼす可能性について言及しており、筋肉の中でもムネ肉は屠体肉の大部分を締めていることから影響が大きいものと提言している。この点においては過去から様々な検討が行われており、胸筋の発達には性別、年齢、品種および遺伝的要因によっても影響を受けることが知られている（Kidd ら, 1998; Kerr ら, 1999）。また、Kidd ら（1998）は、肥育前期を含む肥育後期（18～49 日齢）の飼料について、1994 年度版の NRC（NRC1994）が推奨する Lys 水準から 25% 強化すると増体重が改善し、FCR も改善傾向にあるが、斃死率が高まる傾向にあったことを報告している。しかしながら、ムネ肉の歩留まりについても 25% 強化時に最も改善したことから報告当時のブロイラーにおいても NRC1994 の推奨値が要求量を充足していなかった可能性を示唆しており、この点からも現代の高増体ブロイラーに対する飼料中の栄養成分の指標として NRC1994 の必須アミノ酸推奨量では不十分である可能性が推察される。なお、本節の試験における浅胸筋/大腿筋比を算出すると、対照区 1.06、Lys5%強化区 1.03、Lys10%強化区 1.08、Lys15%強化区 1.04 および Lys20%強化区 1.13 となった。Aviagen 社によると世界的にはモモ肉よりもムネ肉の需要の方が大きく、元来 ROSS308 はムネ肉の歩留まりを改善する方向で育種改良を進めてきたことのことである。そのため、有効 Lys の強化は浅胸筋重量を増加させ、その歩留まりを改善する一方で発達する筋肉部位が偏った結果、大腿筋の発育に対して影響を与える可能性も考えられた。しかしながら、大腿筋の歩留まりも有効 Lys の強化により若干改善傾向が見られ、浅胸筋および大腿筋を合わせた産肉歩留まり全体が改善傾向にあったことから、鶏肉の各部位の形質に対する影響はほぼなかったものと推察される。

以上のことから、肥育後期の現代のブロイラーにおいて CHM2009 のフィニッシャー2 の有効アミノ酸推奨値に対し、有効 Lys を飼料中に強化することで FCR の改善が期待される。また、増体重に有意差は認められなかった一方で、有効 Lys を強化するに伴い浅胸筋の歩留りが増加する傾向が見られた。この結果からは産肉性においては更なる改善の余地が残されている可能性も示唆される。

本節で示した試験結果は栄養成分として Lys の要求量が高まっていることを示唆したものであり、Lys 単独の水準強化では生体重や FCR の改善において

CHM2009 の有効 Lys 推奨値 0.890% に対し 10% 程度 (0.979%) でプラトーに達しているように見受けられた。過剰なアミノ酸の供給は排泄のための脱アミノ化でエネルギーロスに繋がる可能性もあり、適性量に留めることが理想である。しかしながら、その一方でムネ肉の歩留りが増加する傾向も見られており、産肉性に着目した場合において Lys を用いた生産性の改善の余地があるものと推察される。したがって、この Lys をさらに有用活用できる手法が確立できれば現代のブロイラーの生産能にとっても有益であるものと考えられる。しかしながら、本節の試験水準内では特に問題は見られなかったが、Lys をさらに多く供給するリスクとして、一般的にはアミノ酸のインバランスや拮抗作用といった問題が挙げられる。そこで次章では、それらの問題を踏まえリスクを軽減しつつ飼料中の有効 Lys 強化の有用性を高めるための栄養成分設計について検討することとした。

表 3-2-1a. 後期(19～35 日齢)における試験飼料の配合率、組成および計算値

後期試験飼料 原料 (%)	対照区	Lys5% 強化区	Lys10% 強化区	Lys15% 強化区	Lys20% 強化区
とうもろこし	52.27	52.26	52.27	52.26	52.26
とうもろこし基材粉	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
マイロ	10.62	10.71	10.80	10.90	10.99
大豆油かす (HP)	14.73	14.60	14.47	14.34	14.21
なたね油かす	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
魚粉 (65%)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Y.G. (27 度)	4.10	4.08	4.05	4.03	4.01
炭酸カルシウム (粉)	1.130	1.140	1.140	1.140	1.140
リン酸カルシウム(トリカホス)	0.560	0.560	0.560	0.560	0.560
食塩	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160
L-リジン (98.5%)	0.080	0.140	0.200	0.260	0.320
DL-メチオニン (99%)	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
フィターゼ	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
ビタミンミネラルプレミックス*	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
粗蛋白質 (%)	18.20	18.20	18.20	18.20	18.20
粗脂肪 (%)	6.60	6.60	6.60	6.60	6.50
粗繊維 (%)	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30
粗灰分 (%)	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
ME(kcal/kg)	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150
カルシウム (%)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
総リン (%)	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
有効リン (%)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
A. Lys (%)	0.89	0.93	0.97	1.02	1.07
T. Lys (%)	1.02	1.06	1.10	1.15	1.19
A. Met (%)	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
A. Met+Cys (%)	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
A. Thr (%)	0.62	0.62	0.61	0.61	0.61
A. Arg (%)	1.10	1.09	1.09	1.08	1.08

※ A. Lys, 有効リジン; T. Lys, 総リジン; A. Met, 有効メチオニン; A. Met+Cys, 有効メチオニン+シスチン; A. Thr, 有効スレオニン; A. Arg, 有効アルギニン

※ 各区におけるリジンの強化割合は対照区比で示した

* ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; メナジオン 2.9mg/kg; ビタミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン 0.13mg; ピリドキシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨウ素 1.3mg

表 3-2-1b. 仕上期(35～42 日 齢)における試験飼料の配合率、組成および計算値

仕上期試験飼料 原料(%)	対 照 区	Lys5% 強 化 区	Lys10% 強 化 区	Lys15% 強 化 区	Lys20% 強 化 区
とうもろこし	52.27	52.26	52.26	52.27	52.26
とうもろこし基材粉	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
マイロ	9.43	9.46	9.48	9.51	9.54
大豆油かす (HP)	18.36	18.15	17.94	17.72	17.52
なたね油かす	5.43	5.55	5.68	5.80	5.92
魚 粉 (65%)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Y. G. (27 度)	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20
炭 酸 カ ル シ ウ ム (粉)	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130
リン酸カルシウム(トリカホス)	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620
食 塩	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
L-リジン (98.5%)	0.040	0.110	0.170	0.230	0.290
DL-メチオニン (99%)	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170
フ ィ タ ー ゼ	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
ビ タ ミ ン ミ ネ ラ ル プ レ ミ ッ ク ス *	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
粗 蛋 白 質 (%)	18.20	18.20	18.20	18.20	18.20
粗 脂 肪 (%)	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50
粗 繊 維 (%)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
粗 灰 分 (%)	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
ME(kcal/kg)	3,300	3,300	3,300	3,300	3,300
カ ル シ ウ ム (%)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
総 リ ン (%)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
有 効 リ ン (%)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
A. Lys(%)	0.89	0.94	0.98	1.03	1.07
T. Lys(%)	1.00	1.05	1.10	1.14	1.18
A. Met(%)	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
A. Met+Cys(%)	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
A. Thr(%)	0.62	0.62	0.62	0.62	0.61
A. Arg(%)	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00

※ A. Lys, 有効リジン; T. Lys, 総リジン; A. Met, 有効メチオニン; A. Met+Cys, 有効メチオニン+シスチン; A. Thr, 有効スレオニン; A. Arg, 有効アルギニン

※ 各区におけるリジンの強化割合は対照区比で示した

* ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; メナジオン 2.9mg/kg; ビタミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン 0.13mg; ピリドキシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨウ素 1.3mg

表 3-2-2a. 後期(19～35 日齢)における各試験飼料の分析値

後期試験飼料	対照区	Lys5% 強化区	Lys10% 強化区	Lys15% 強化区	Lys20% 強化区
粗蛋白質(%)	18.5	18.6	18.7	18.8	19.1
粗脂肪(%)	6.8	6.6	6.7	6.8	6.6
粗繊維(%)	2.2	2.5	2.3	2.2	2.6
粗灰分(%)	4.6	4.5	4.4	4.6	4.6
水分(%)	11.9	11.9	12.0	11.9	11.9
カルシウム(%)	0.86	0.91	0.88	0.87	0.86
総リン(%)	0.59	0.61	0.62	0.60	0.60
総リジン(%)	1.08	1.13	1.15	1.24	1.24

すべての成分値は公定法にて分析した。

表 3-2-2b. 仕上期(35～42 日齢)における各試験飼料の分析値

仕上試験飼料	対照区	Lys5% 強化区	Lys10% 強化区	Lys15% 強化区	Lys20% 強化区
粗蛋白質(%)	19.0	19.0	18.7	18.6	18.9
粗脂肪(%)	8.3	8.4	8.4	8.5	8.4
粗繊維(%)	2.0	2.3	2.0	2.3	2.5
粗灰分(%)	4.4	4.4	4.5	4.5	4.5
水分(%)	11.4	11.7	11.6	11.8	11.7
カルシウム(%)	0.86	0.88	0.91	0.87	0.85
総リン(%)	0.60	0.59	0.62	0.57	0.57
総リジン(%)	1.12	1.13	1.16	1.25	1.22

すべての成分値は公定法にて分析した。

表3-2-3. 有効リジン水準を5%から20%まで強化した飼料をROSS308系ブロイラーに給与したときの各日齢における生体重および試験終了42日齢時点における育成率の比較^{*1}

試験区 ^{*2}	有効リジン 含量(%)	生体重, g/羽					育成率 ^{*3} , % 42日齢時
		19日齢	28日齢	38日齢	42日齢		
対照区	0.890	836 ± 34.5	1759 ± 65	2606 ± 65	3285 ± 90		95.0
Lys5%強化区	0.935	835 ± 35.2	1771 ± 76	2616 ± 45	3345 ± 66		92.5
Lys10%強化区	0.979	836 ± 33.4	1817 ± 57	2673 ± 74	3431 ± 85		92.5
Lys15%強化区	1.024	835 ± 33.7	1776 ± 46	2627 ± 64	3382 ± 107		92.5
Lys20%強化区	1.068	834 ± 32.9	1787 ± 63	2658 ± 83	3333 ± 150		95.0

平均値±標準偏差, n = 4

^{*1}, ² チャンキーマニユアル2009年度版の栄養成分表のフイニジンヤー2に記載された有効アミノ酸(AA)水準を100%とし、MEを19日齢から35日齢まで3,150kcal/kg、35日齢から42日齢まで3,300kcal/kgとした飼料を給与した区を対照区とした。対照区に対し、有効リジンを5%, 10%, 15%および20%強化した飼料を給与した区を各々Lys5%強化区、Lys10%強化区、Lys15%強化区およびLys20%強化区とした。

表3-2.4. 有効リジン水準を5%から20%まで強化した飼料をROSS308系ブロイラーに給与したときの各生産成績指標に及ぼす影響*1

試験区*2	対照区		Lys5%強化区		Lys10%強化区		Lys15%強化区		Lys20%強化区	
増体重, g/羽										
19～28日齢	924	± 34	936	± 42	981	± 28	941	± 13	952	± 35
28～35日齢	847	± 27	845	± 57	857	± 31	851	± 38	871	± 36
35～42日齢	679	± 59	729	± 49	758	± 71	755	± 45	675	± 86
19～42日齢	2450	± 80	2510	± 54	2595	± 74	2547	± 81	2498	± 143
飼料摂取量, g/羽										
19～28日齢	1441	± 56 a	1446	± 50 a	1479	± 41 b	1436	± 28 ab	1449	± 47 ab
28～35日齢	1514	± 89	1458	± 129	1489	± 74	1446	± 82	1490	± 54
35～42日齢	1485	± 104	1435	± 69	1437	± 61	1450	± 97	1403	± 115
19～42日齢	4440	± 135	4339	± 152	4405	± 116	4331	± 158	4342	± 159
飼料要求率(FCR)										
19～28日齢	1.560	± 0.027 a	1.546	± 0.021 ab	1.508	± 0.002 c	1.526	± 0.014 ac	1.522	± 0.008 bc
28～35日齢	1.786	± 0.087	1.725	± 0.037	1.738	± 0.077	1.700	± 0.118	1.711	± 0.077
35～42日齢	2.190	± 0.083	1.966	± 0.151	1.908	± 0.176 †	1.922	± 0.090 †	2.083	± 0.127
19～42日齢	1.812	± 0.043	1.727	± 0.059	1.698	± 0.059 †	1.701	± 0.059 †	1.738	± 0.056

平均値±標準偏差, n=4

abc 異なる肩文字をもつもの同士の間には有意差あり (P < 0.05)

† 対照区に対し、改善する傾向あり (P < 0.01)

*1 生産成績は各日齢間における増体重、飼料摂取量およびFCRとした

*2 チヤンキーマニエアル2009年度版の栄養成分表のフィニッシャー2に記載された有効アミノ酸(AA)水準を100%とし、MEを19日齢から35日齢まで3,150kcal/kg、35日齢から42日齢まで3,300kcal/kgとした飼料を給与した区を対照区とした。対照区に対し、有効リジンを5%, 10%, 15%および20%強化した飼料を給与した区を各々Lys5%強化区、Lys10%強化区、Lys15%強化区およびLys20%強化区とした。

表3-2-5. 試験終了時42日齢における鶏肉・脂肪歩留まり^{*1}に与える有効リジン強化飼料^{*2}の影響

試験区	対照区		Lys5%強化区		Lys10%強化区		Lys15%強化区		Lys20%強化区	
処理前生体重 ^{*3} (g/羽)	3438 ±	57.36 ^a	3588 ±	72.47 ^{ab}	3567	100.3 ^{ab}	3583	95.14 ^{ab}	3594	115.5 ^b
組織重量	(g)									
大腿筋	292.6 ±	25.0 ^a	303.0 ±	22.7 ^{ab}	318.9 ±	22.7 ^{ab}	315.5 ±	28.3 ^{ab}	348.5 ±	15.8 ^b
浅胸筋	277.0 ±	10.5 ^a	293.5 ±	10.9 ^{ab}	296.2 ±	14.5 ^{ab}	304.4 ±	11.4 ^b	300.1 ±	19.4 ^{ab}
腹腔内脂肪	60.1 ±	21.5	74.8 ±	19.2	65.1 ±	11.7	67.2 ±	17.6	66.8 ±	13.3
歩留まり	(%)									
大腿筋	8.5 ±	0.6 ^a	8.4 ±	0.6 ^a	8.9 ±	0.5 ^{ab}	8.8 ±	0.6 ^{ab}	9.7 ±	0.7 ^b
浅胸筋	8.1 ±	0.4	8.2 ±	0.2	8.3 ±	0.3	8.5 ±	0.3	8.3 ±	0.4
腹腔内脂肪	1.8 ±	0.7	2.1 ±	0.5	1.8 ±	0.3	1.9 ±	0.5	1.9 ±	0.3
平均値±標準偏差, n = 6										

^{a,b}異なる肩文字を持つもの同士の間で有意差あり(P < 0.05)

^{*1} 鶏肉はモモ肉として大腿筋、ムネ肉として浅胸筋とし右側のみ採取。脂肪は腹腔内脂肪とした

^{*2} チャンキーマニユアル2009年度版の有効アミノ酸値100%を対照区とし、各々5, 10, 15および20%強化した飼料

^{*3} 歩留まり測定に供試した個体の重量を示した

第 3 節

リジン含量強化時のスレオニンならびにアルギニンの適正比率の検討

1. 緒言

これまでに示したように、現代のブロイラーは飼料中の栄養成分として必須アミノ酸の質や量に反応して生産性能が改善する傾向があり、NRC や日本飼養標準など学会が推奨する指標や種鶏メーカーが推奨するマニュアルの指標が最適ではない可能性が示唆された。しかしながら、配合飼料の栄養設計を行う際、必須アミノ酸の設計は各アミノ酸が充足するように計算されるため、すべての必須アミノ酸を高めようとするすると粗タンパク質（CP）含量として高くなる傾向がある。その結果、CP 過多となり、過剰な窒素源を体内で処理するために要するエネルギーコストや代謝異常の発生など、逆にブロイラーの生産性に悪影響を及ぼす可能性も懸念される。そこで第 1 節ではまずとうもろこし-大豆粕を主体としたブロイラー飼料において第一制限アミノ酸とされるリジン（Lys）および含硫アミノ酸（TSAA）について、現代のブロイラーの FCR に及ぼす影響をスクリーニング的に調査した。その結果、陽性対照としてすべての必須アミノ酸を有効値で 10% 強化した飼料で増体重や FCR は改善する傾向が確認され、Lys を 10% 強化した飼料の給与区も同様に改善傾向が見られた。一方で TSAA の強化ではそれらの反応が見られなかった。そこで、第 2 節においては有効 Lys の用量反応性の試験を実施したところ、Lys 強化に伴い FCR が改善する傾向が見られ 10% 強化程度でプラトーに達する傾向が見受けられた。しかしながら、ムネ肉の歩留りは Lys10% 強化よりも 20% 強化で改善する傾向があり、産肉性の面でまだ改善の余地があるものと推察された。そこで本節では飼料中の Lys 含量を変化させた上で、他のアミノ酸の含量も変化させ、Lys をさらに有効活用することを試みることにした。しかしながら 1 種類あるいは数種類のアミノ酸を変化させた際に、他のアミノ酸の要求量を求めることは簡単ではない。その理由をアミノ酸バランスの求め方の歴史と共に詳述する。

最適なアミノ酸バランスを知るための方法として、過去、標準アミノ酸混合物を飼料タンパク質の代わりに用いて、その中の必須アミノ酸を 1 種類ずつ抜

いて基礎飼料とし、それにそのアミノ酸を段階的に加えて、いわゆる **dose response curve** を描き、その曲線が水平になる点の添加量をもって要求量とする方法が用いられた（アミノ酸飼料学，チクサン出版社）。ヒナを用いた報告としては Sugahara（1969）らも用いた Scott の **reference diet** が有名である。しかしながらこの方法は、対象となるアミノ酸を含まない基礎飼料に段階的に当該アミノ酸を添加して、それ以上、増体や窒素出納が改善されない量を測定するが、各アミノ酸の効果の間に交互作用がないことを前提としている点に問題があった。各アミノ酸間の交互作用の発生により測定される要求量の数値が変わることが懸念されるが、この問題を克服するため、Scott らのグループはアミノ酸混合物の各アミノ酸の含量を少しずつ変化させた試験を数多く実施し、表 3-3-1 に示した「Scott の **reference diet**」にまとめている（「アミノ酸飼料学，チクサン出版社」P94 表 6-6 より引用）。ところが当設計指標は低水準の成長時のアミノ酸バランスが最大成長時でも最適との保証はないとの矛盾から、実際の配合飼料とはかけ離れたものとみなされた。その後、実際の立場に立って、とうもろこし-大豆粕主体飼料を **reference diet** としてそれまでの知見を反映させ、アミノ酸バランスやアミノ酸要求量に関する研究が進められるようになった。この前提を基に、それぞれの飼料や飼育目的等の条件下での第一制限アミノ酸を探り出し、アミノ酸を添加すると共に、タンパク質量を減少させるという作業を通して理想的なアミノ酸バランスに近づけていく取組みが進められ、現在のマニュアル等の水準指標となっている。すなわち、制限アミノ酸の要求量を検討しつつ、別のアミノ酸との相互作用まで考慮する必要がある、試験規模やその環境条件の設定に加え、多くの時間を要すことも評価の難しさを誘発する原因といえる。

アミノ酸の主要な相互作用は、一般的に欠乏、インバランス、拮抗作用および毒性などが知られている。すなわち配合飼料は各動物がこれらによって生産性を抑制されないように構成されるべきである。第 2 節の飼料中の Lys 強化による増体性能や FCR の改善は、基礎飼料が現代の高増体ブロイラーにとっての Lys 要求量に対して不足していたがために起こったものと推察される。また、一定水準以上の Lys 含量では要求量を充足したため生産性能の改善がプラトーに達したと考えられた。しかしながら、ムネ肉の歩留りは飼料中の Lys 含量を増やすことに伴い改善していたことから、体内での反応性は異なる可能性があり、改良の余地があることが示唆される。本論文内では詳述しないが、チャン

キーマニュアル 2009 年度版のフィニッシャー2の有効アミノ酸推奨値に対し有効 Lys を 15%強化した飼料に有効 TSAA を 5%および 10%添加した飼料を作出し、肥育後期のブロイラーに対する給与試験を試みた。しかしながら、結論として増体性能や FCR に変化は見られなかった。この結果からは Lys 強化時において第一制限アミノ酸とされるもう一方の TSAA が欠乏し、制限となった可能性は低いものと推察された。

本節では Lys 強化飼料の有効活用を目的として、とうもろこし-大豆粕主体のブロイラー用飼料として第三制限アミノ酸として知られるスレオニン (Thr) について、高い Lys 水準での制限要因になり得るか確認することとした。また、古くから各種動物、ニワトリでは特に幼雛期に対して Lys 過剰の飼料を給与するとアルギニン (Arg) との拮抗作用が発生することが知られているが、飼料中に Arg を高濃度で補給することでこの拮抗作用が抑制され、成長が改善されたとの報告がある (O' Dell と Savage, 1966)。このような拮抗作用による成長不良の問題が起きないようにするため、一般に Arg/Lys 比は 1.00 を超えないように設計される。本節の試験では可能な限りチャンキーマニュアルで推奨される必須アミノ酸バランスとなるように配合設計した結果、対照区の CP は 17.1% となった。また、有効 Arg 含量もマニュアルで推奨された水準に据え置いた結果、Arg/Lys 比はマニュアルで 1.04 に対し、0.95 となった。したがって Lys 強化時における Thr 以外の要因として Arg との拮抗作用が関係する可能性も示唆されたため、第 2 節で FCR が改善した Lys10%強化飼料の Arg/Lys 比 (1.00) と同等の条件とする試験区も設け、同時に評価することとした。

2. 材料および方法

(1) 供試鶏

ROSS308 (UK 産チャンキー) のオスの初生ヒナを株式会社森孵卵場より 100 羽購入し、日本農産工業株式会社畜産技術センターのウインドウレス鶏舎 (ペン室) にて、CP22.5%, ME3,000kcal/kg のクランブル飼料を用いて 7 日齢まで、CP19.8%, ME3,100kcal/kg のマッシュ飼料にて 21 日齢まで馴致後、体重の近い個体 60 羽を選抜した。選抜した 21 日齢時のヒナは平均体重が概ね揃うように、以下に詳述する 4 試験区 (対照区、Thr 強化区、Arg 調整区および Thr×Arg 区) に対し各々 15 羽ずつ振り分けて試験に供した (反復数 n=1)。舎内温度等の環

境条件については ROSS308 Management Handbook (Aviagen)に準じ、調整を図った。なお、馴致後、試験に供試しなかったヒナは定法に従い、頸椎脱臼によって淘汰（安楽死）した。

(2) 試験区

本試験では、飼料中の ME 水準を 3,200kcal/kg とした。試験飼料の有効アミノ酸はチャンキーマニュアル 2009 年度版 (CHM2009) のフィニッシャー 2 (F2) で推奨された有効アミノ酸水準を基準とし、そのうち有効 Lys のみ 10% 高めた飼料を対照区とした。Thr 強化区の飼料は対照飼料の設計に対し、Kidd ら (2004b) の報告で推奨された Thr/Lys 比 0.68 になるように結晶アミノ酸である L-スレオニンを用いて配合設計した。すなわち、有効 Lys 0.98% に対し、有効 Thr は 0.67% となる。Thr×Arg 区の有効 Thr についても同様の考えに基づき強化した。一方、Arg 調整区および Thr×Arg 区の飼料は Arg/Lys 比が 1.00 になるように有効 Arg を 0.98% に設計した。この比の設定理由は、第 2 節における Lys の用量反応試験で FCR が改善した Lys110%強化区の有効 Arg 含量が 0.98% (CP18.2%) であり、このときの条件に合わせるためである。以上の条件を満たすように、第 2 章第 1 節 2(1)で示した飼料システム（日本農産工業(株)、神奈川県横浜市）を用いて LP 計算して配合率を作成し、試験飼料を作製した。これらを整理すると表 3-3-2 の通りとなる。また、各試験飼料の配合詳細は表 3-3-3、分析値は表 3-3-4 に示した。

(3) 測定項目および統計処理

21, 28, 35 および 42 日齢の体重を測定し、21~42 日齢における増体重、飼料摂取量および FCR を算出した。なお、試験に供試した鶏は株式会社染谷食鳥（茨城県）に適切に出荷した。また、各日齢における体重は、統計ソフト R version 3.5.1 (Windows 版) を用い、Rcmdr を使用して Tukey の多重比較検定を行った。

3. 結果

試験開始後の各週齢における体重ならびに週齢間の増体重、飼料摂取量および FCR を表 3-3-5 に示した。

試験終了の 42 日齢時の体重において各試験区間で有意差は認められなかつ

た。ただし、Thr×Arg 区の 2 個体においては 35 日齢から 42 日齢まで増体差がほぼなかった。そのため、標準偏差も他の区と比較して大きいものとなっており、仮に棄却検定を実施した場合、 $3,768 \pm 278$ と他の区よりも平均体重が大きくなる傾向があった。一方、試験期間（21～42 日齢）における増体重、飼料摂取量および FCR は反復数 $n=1$ のため、統計処理できなかったが、対照区に対し、Thr 強化区、Arg 調整区および Thr×Arg 区で FCR は改善する傾向が見られた。特に Thr を強化した Thr 強化区および Thr×Arg 区の食下量が減少する傾向にあり、結果として FCR が優れる傾向にあった。また、FCR においては、Arg 調整区よりも Thr 強化区の方が優れる傾向が見られ、有効 Arg を調整した上で有効 Thr 水準を強化した Thr×Arg 区が最も優れる傾向が見られた。

4. 考察

本節では、前節において成長性能を改善した Lys 強化飼料に対し、更なる生産性改善を求めて、第三制限アミノ酸とされる Thr を強化した飼料の給与試験を肥育後期のブロイラーに対して実施した。その結果、生体重の増加は見られなかったものの、有効 Thr 水準の強化によって食下量が減少し、FCR が改善する傾向が見られた。Thr の要求量に関する研究は Lys や TSAA の研究と同様に数々の報告がある。たとえば Kidd ら（1997）は Lys と Thr の相互作用によってムネ肉の収量が増加したことを示しており、そのときの Thr/Lys 比は 0.70 としている。また、その後の研究では 21～42 日齢のブロイラーの Thr 要求量は、増体性能および鶏肉歩留りを考慮すると、可消化 Thr として 0.65% および Thr/Lys 比で 0.68 と推定している（Kidd ら，2004b）。この報告は、Mejia ら（2012）の研究結果によっても支持されている。さらに、Ahmadi ら（2010）は報告された研究論文 7 報かつ 92 の用量反応性試験のデータを用いたメタ解析の結果、21～42 日齢のブロイラーにおける飼料中の最適な CP および Thr 含量は、増体重において CP 18.69% および Thr 0.73% であり、FCR においては CP 18.71% および Thr 0.75% と報告している。Lys については言及がなかったものの、チャンキーマニュアル 2009 年度版（CHM2009）のフィニッシャー 2（F2）において総 Thr が 0.68%、2014 年度版 Table 3（CHM2014）の F2 では 0.73% とされており、概ね近い水準であると考えられる。本節の試験では表 3-3-2 の通り、飼料中の有効 Lys を 110% の水準に高めたため（有効 Lys として 0.98%）、対照区の Thr/Lys

比は 0.61 (有効 Thr として 0.60%)、Arg/Lys 比は 0.95 (有効 Arg として 0.93%) となった (CP17.1%)。一方、Thr 強化区は結晶アミノ酸である L-スレオニンで調整し、Thr/Lys 比を 0.68 (有効 Thr として 0.67%) になるよう設計した (CP17.2%)。この栄養成分設計は、Ahmadi ら (2010) のメタ解析結果より推定される最適 CP より低いものの、Thr 含量は同等か若干高い水準であり (0.76%)、Thr/Lys 比は Kidd ら (2004b) の報告と同等 (0.68) であった。本試験では Thr 強化区の FCR が対照区と比較して改善する傾向が見られていたことから、Lys 水準を高めた条件下でも Thr/Lys 比は 0.68 に維持した方が生産性能は改善する可能性が示唆された。これは、Everett ら (2010) が報告したコマーシャルのオスブロイラー (28~42 日齢) における Lys (2 段階) と Thr (4 段階) の 2×2 因子に対する反応の評価で、Lys の水準にかかわらず Thr が強化されるに伴い増体重や FCR に改善傾向が見られていた結果からも推察される。また、Arg 調整区および Thr×Arg 区は主に植物質性原料である大豆油かすを用いて飼料中の Arg/Lys 比が 1.00 になるように調整を図った。そのため、飼料中の CP 含量は各々 17.7% および 17.8% となり、対照区や Thr 強化区と比較し、高い CP 計算値となった。有効 Arg の調整のみによっても FCR が改善する傾向は見られたが、有効 Thr を同時に強化することでさらに FCR は良化する傾向が見られた。したがって、異なる CP 条件下でも Thr/Lys 比は 0.68 に維持する方が妥当である可能性が示唆された。なお、対照区よりも Arg 調整区、Thr 強化区よりも Thr×Arg 区の方が FCR の改善は大きかったことから、Arg/Lys 比が 1.00 よりも小さくなることによるアミノ酸のインバランスや拮抗の発生の是非は不明であるが、有効 Arg あるいは CP (もしくは他の必須アミノ酸) の要求量は有効 Arg を調整しなかった区においては充足していない可能性があるものと示唆された。

以上より、CHM2009 の F2 の有効 Lys 水準を 10%強化した飼料 (有効 Lys 含量 0.98%) に対し、有効 Thr 含量を 0.67% とすることで FCR が改善することが示唆され、一般に推奨される Thr/Lys 比 0.68 の比率は、有効 Lys を強化した条件下においても適用されるものと推察された。一方、有効 Arg を Arg/Lys 比 1.00 になるように調整することによっても FCR は良化する傾向が見られ、有効 Arg あるいは他の必須アミノ酸の要求量については検討の余地が残るが、本試験結果からは Thr を強化したことによる影響の方が大きい反応が見られた。

本節の試験設計では有効 Lys の強化水準は 10%としたが、有効 Lys をさらに強化し、かつ有効 Thr との比率を Thr/Lys 比 0.68 に維持すれば、FCR の更なる改善を図れる可能性がある。したがって次節では有効 Lys を本節の試験水準以上に強化しても、Thr/Lys 比が 0.68 で至適となり FCR を改善するか検討した。

表3-3-1. Scottのreference diet*

アミノ酸混合物		コーン・スターチ	56.15
L-アルギニン・HCl	1.21	トウモロコシ油	15.00
L-ヒスチジン・HCl・H ₂ O	0.41	混合塩	5.37
L-リジン・HCl	1.19	NaHCO ₃	1.00
DL-メチオニン	0.35	セルロース	3.00
L-シスチン	0.35	塩化コリン	0.20
L-フェニルアラニン	0.50	ビタミン混合物	
L-チロシン	0.45	エトキシキン	
L-トリプトファン	0.15		
L-イソロイシン	0.60	蛋白質当量	14.5%
L-ロイシン	1.20	ME	4300kcal/kg
L-バリン	0.82		
L-プロリン	0.20		
L-スレオニン	0.65		
グリシン	1.20		
L-グルタミン酸	10.00		

*「アミノ酸飼料学」チクサン出版社, P94掲載の表6-6 を引用
元文献: Sugaharaら (1996)

表3-3-2. 各試験区の有効リジン, 有効スレオニン, 有効アルギニン, CPおよびMEの設計内容*

試験区	有効Lys, %	有効Arg, %	Arg/Lys比	有効Thr, %	Thr/Lys比	CP, %	ME, kcal/kg
対照区	0.98	0.93	0.95	0.60	0.61	17.1	3200
Thr強化区	0.98	0.93	0.95	0.67	0.68	17.2	3200
Arg調整区	0.98	0.98	1.00	0.61	0.62	17.7	3200
Thr×Arg区	0.98	0.98	1.00	0.67	0.68	17.8	3200
CHM2009(参考)	0.89	0.93	1.04	0.60	0.67	17-21	3225

* CHM2009を基準とし、有効Lysを10%強化した飼料を対照区とし、各々のアミノ酸水準を強化もしくは調整した
Lys, リジン; Arg, アルギニン; Thr, スレオニン; CHM2009, チャンキーマニュアル2009年度版 フィニッシャー2

表 3-3-3. 各試験飼料の配合率、組成および計算値

原料 (%)	対照区	Thr 強化区	Arg 調整区	Thr×Arg 区
とうもろこし	60.39	60.22	58.38	58.24
とうもろこし基材粉	3.00	3.00	3.00	3.00
マイロ	2.00	2.00	2.00	2.00
大油かす (LP)	13.87	13.89	15.69	15.69
なたね油かす	10.00	10.00	10.00	10.00
魚粉 (65%)	3.00	3.00	3.00	3.00
Y.G. (27 度)	5.24	5.30	5.54	5.59
炭酸カルシウム (粉)	1.120	1.120	1.110	1.110
リン酸カルシウム(トリカホス)	0.590	0.590	0.580	0.580
食塩	0.160	0.160	0.160	0.160
L-リジン (98.5%)	0.250	0.250	0.200	0.200
DL-メチオニン (99%)	0.170	0.170	0.150	0.150
L-スレオニン (98.5%)	0.010	0.100	-	0.080
フィターゼ	0.100	0.100	0.100	0.100
ビタミンミネラルブレミックス*	0.100	0.100	0.100	0.100
粗蛋白質 (%)	17.10	17.20	17.70	17.80
粗脂肪 (%)	7.70	7.80	8.00	8.00
粗繊維 (%)	2.50	2.50	2.50	2.50
粗灰分 (%)	4.80	4.80	4.90	4.90
ME(kcal/kg)	3,200	3,200	3,200	3,200
カルシウム (%)	0.90	0.90	0.90	0.90
総リン (%)	0.56	0.56	0.57	0.57
有効リン (%)	0.30	0.30	0.30	0.30
A. Lys (%)	0.98	0.98	0.98	0.98
T. Lys (%)	1.10	1.10	1.10	1.10
A. Thr (%)	0.60	0.67	0.61	0.67
T. Thr (%)	0.67	0.76	0.67	0.76
A. Arg (%)	0.93	0.93	0.98	0.98
T. Arg (%)	1.03	1.03	1.09	1.09
A. Met (%)	0.44	0.44	0.43	0.43
A. Met+Cys (%)	0.69	0.69	0.69	0.69

※ A. Lys, 有効リジン; T. Lys, 総リジン; A. Thr, 有効スレオニン; T. Thr, 総スレオニン; A. Arg, 有効アルギニン; T. Arg, 総アルギニン; A. Met, 有効メチオニン; A. Met+Cys, 有効メチオニン+シスチン

* ビタミン A 9,200IU; ビタミン D3 4,200IU; ビタミン E 15IU; メナジオン 2.9mg/kg; ビタミン B12 13μg/kg; コリン 38mg; リボフラビン 6.7mg; ナイアシン 50mg; D-ビオチン 0.13mg; ビリドキシン 3.4mg; マンガン 130mg; 亜鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨウ素 1.3mg

表 3-3-4. 各試験飼料の分析値

試験区	対照区	Thr 強化区	Arg 調整区	Thr×Arg 区
粗蛋白質 (%)	17.70	18.00	18.56	18.49
粗脂肪 (%)	7.67	7.55	7.73	7.90
粗繊維 (%)	2.30	2.19	2.51	2.47
粗灰分 (%)	4.18	4.24	4.33	4.40
水分 (%)	12.55	12.47	12.45	12.10
カルシウム (%)	0.81	0.85	0.79	0.81
総リン (%)	0.51	0.53	0.52	0.52
総リジン (%)	1.12	1.13	1.08	1.13
総スレオニン (%)	0.72	0.82	0.72	0.82
総アルギニン (%)	1.04	1.05	1.05	1.09
総メチオニン (%)	0.46	0.49	0.49	0.49
総メチオニン+シスチン (%)	0.78	0.83	0.84	0.85

すべての成分値は公定法にて分析した。

表3-3-5. 有効リジン強化飼料に対する有効スレオニン強化もしくは有効アルギニンの調整、および両方を同時に実施した飼料を肥育後期のブロイラーに給与したときの各日齢の体重および21～42日齢の各生産指標に及ぼす影響^{*1}

試験区 ^{*2}	対照区	Thr強化区	Arg調整区	Thr×Arg区
体重(g/羽)				
21日齢 (試験開始時)	1051 ± 9	1052 ± 9	1052 ± 9	1052 ± 9
28日齢	1837 ± 52	1889 ± 57	1852 ± 63	1893 ± 84
35日齢	2635 ± 110	2702 ± 104	2651 ± 137	2692 ± 308
42日齢 (試験終了時)	3517 ± 237	3528 ± 339	3534 ± 212	3531 ± 677
増体重 (g/羽)	2466	2477	2482	2479
飼料摂取量 (g/羽)	4279	4084	4169	4061
FCR	1.735	1.649	1.680	1.638

体重は平均値±標準偏差, n=15 その他の生産指標は反復数n=1

*1 生産指標は各日齢における体重、各日齢間の増体重、飼料摂取量およびFCRを示した

*2 対照区の有効アミノ酸はチヤンキーマニユアル2009年度版のフイニツシャー2を基準として、有効リジンを10%強化した飼料を給与した区とした。なお、CP値は設計せず、同マニユアルに掲載された有効必須アミノ酸（リジン、メチオニン、メチオニン+シスチン、スレオニン、アルギニン、バリン、イソロイシンおよびトリプトファン）の要求量を満たすように設計した（CP 17.1%）Arg調整区はArg/Lys比が1.00になるよう調整した区とした。Thr強化区はThr/Lys比が0.68になるようThrを強化した区、さらにThr×Arg区はThr強化区とArg調整区の両方を考慮した区とした。
Lys, リジン; Thr, スレオニン; Arg, アルギニン

第 4 節

リジン含量の大幅な強化および適切なスレオニン比率の検討

1. 緒言

肥育後期のブロイラーにおいて、飼料中のリジン（Lys）を強化し、かつスレオニン（Thr）の水準を Kidd ら（2004b）が推奨する Thr/Lys 比である 0.68 にすると、FCR が改善する傾向が見られた。この傾向は生育体重が変化しない一方で、飼料摂取量が減少した結果もたらされたものであった。

前節で詳述した通り、肥育後期のブロイラーに対して数種類のアミノ酸を組み合わせて要求率を検討することは容易ではなく、飼料中の高い Lys 水準と Thr 水準の組み合わせの効果に関する情報は限られている。Everett ら（2010）は、コマーシャルのオスブロイラー（28～42 日齢）における Lys（2 段階）と Thr（4 段階）の 2×2 因子に対する反応の評価を行っている。この報告では、飼料中の Lys および Thr を高めることで幾つかの生産性能を改善したことを示している。また、肥育初期のブロイラーヒナにおいて推定される理想の Thr/Lys 比は、増体重改善のために 0.70 および FCR 改善のために 0.66 との報告もある（Mehri ら，2012）。しかしながら、肥育後期のブロイラーに対する飼料において、更なる高水準の Lys 含量にしたときの適切な Thr 含量もしくは Thr/Lys 比については不明である。肥育後期の期間における成長成績は産肉性の向上において重要なポイントであり、注目に値すると考えられる。そこで本節では、肥育後期段階にある現代の高増体ブロイラーにおいて、増体重や FCR などの生産性能の指標に対する高 Lys 飼料における最適な Thr/Lys 比（0.68）の効果を評価した。

2. 材料および方法

(1) 供試鶏

ROSS308（UK 産チャンキー）のオスの初生ヒナを株式会社森孵卵場より 800 羽購入し、日本農産工業株式会社畜産技術センターのウインドウレス鶏舎（ペ

ン室)にて、CP22.0%、ME3,000kcal/kgのクランブル飼料を用いて7日齢まで、CP20.0%、ME3,100kcal/kgのマッシュ飼料にて21日齢まで馴致後、体重が1kg程度で近い個体18羽を選抜した。選抜した21日齢時のヒナは平均体重が概ね揃うように対照区、高Lys区および高Lys+Thr区の3試験区に対し、各々6羽ずつ振り分けて試験に供試した。また各区に振り分けられた個体は温調可能な部屋において、個別にステンレススチール製のワイヤーケージへ1ケージにつき1羽収容し単飼した。飼料および飲水は自由摂取とし、環境温度は25℃および点灯管理は23時間点灯1時間消灯されるよう調整した。なお、馴致において選抜されずに供試されなかった個体は別の試験に供試した。

(2) 試験区

本試験における試験区の設定を表3-4-1に示した。対照区の飼料はとうもろこし-大豆油かす主体とし、必須アミノ酸含量はAviagen社がROSS308のマニュアル(2007年度版)として推奨する値の100%になるよう調整した(CP18.0%およびME3.2Mcal/kg)。ROSS308マニュアルのLysおよびThrの推奨値は各々飼料中に10.0g/kgおよび6.8g/kgでありこの水準に合わせた。高Lys区の飼料中のLys含量はROSS308マニュアルの推奨値に対して150%とした。この強化レベルはKobayashiら(2011)の知見によって決定した。高Lys+Thr区の飼料中のLysおよびThrの含量は前節と同様、Kiddら(2004b)が21~42日齢の最適Thr/Lys比として報告した0.68の比率を採用した(Thrとして10.2g/kg)。また、本試験では各試験飼料のCP水準を合わせるため、L-グルタミン酸を添加して調整した。なお、飼料中のCP水準は18.0%になるように設計したため、高Lys+Thr区の飼料について第2章第1節2(1)で示した飼料システム(日本農産工業(株)、神奈川県横浜市)を用いて配合率を作成し、高Lys区はとうもろこしとL-グルタミン酸の置換え、対照区はとうもろこしおよび塩酸L-リジンとL-グルタミン酸を置換える形で栄養成分を調整した。これらによって設計された各試験飼料の配合組成および各栄養成分を表3-4-2に、製造された試験飼料の分析値を表3-4-3に示した。

なお、各試験区すべてのニワトリの翼下静脈から血液サンプルを採取し、血漿分離後、分析に与するまで-80℃にて保存した。血液の用途等の詳細については第4章で記す。

(3) 測定項目および統計処理

21, 28, 35 および 38 日齢の体重を測定し、21～38 日齢時の 17 日間における増体重、飼料摂取量および FCR を算出した。本試験に供試した鶏は採血後、定法によって頸椎脱臼し淘汰した。得られたデータは、統計ソフト R version 3.5.1 (Windows 版) を用い、Rcmdr を使用して Tukey の多重比較検定を行った。

3. 結果

試験開始後の各週齢における体重ならびに週齢間の増体重、飼料摂取量および FCR を表 3-4-4 に示した。

試験期間における増体重は対照区と比較して高 Lys 区で有意に増加した ($P < 0.05$)。しかしながら、高 Lys+Thr 区の増体重は他の 2 区と比較して有意差は認められなかった。飼料摂取量は各試験処理間によって変化が見られなかったが、FCR は対照区 (1.686) と比較して高 Lys 区 (1.584) および高 Lys+Thr 区 (1.606) の 2 区共に有意に改善した ($P < 0.05$)。

4. 考察

前節では有効 Lys 水準を 10% 強化した飼料に対し、Thr/Lys 比 0.68 となるように有効 Thr 水準を高めた飼料を肥育後期のブロイラーに給与すると、Lys 水準のみを強化したときよりも FCR を改善する可能性が示唆された。そこで本節では更なる生産性能改善のため、前節の水準よりも大幅に強化した Lys 水準における Thr の効果を調査することとした。Aviagen 社が肥育後期の ROSS308 系ブロイラーにおいて推奨する Lys 含量に対し、150% と大幅に強化した高 Lys 飼料を作出し、さらにその飼料に Thr/Lys 比 0.68 となるよう Thr を強化した高 Lys+Thr 飼料を作出して、各々 21～38 日齢までの給与試験を実施した。

その結果、15g/kg の高 Lys 飼料給与により肥育後期のブロイラーの増体重および FCR が改善した ($P < 0.05$) (表 3-4-4)。これらの結果は、高 Lys 飼料がブロイラーの生産成績を改善し、Lys の強化が鳥類の産肉性を改善することを明らかにしたものである。飼料中への Lys 添加によってブロイラーの生体重、飼料摂取量および FCR の改善した研究はよく知られており (Leclercq, 1998; Razaei ら, 2004; Sterling ら, 2004; Everett ら, 2010)、本論においても前節まで

に示した通りである。しかしながら、飼料中の Lys 含量の水準を大幅に高めた報告は少ない。近年においては、Watanebe ら（2015）が 14～24 日齢のブロイラーの試験で NRC1994 年版の Lys 要求量を 150% に高めても増体重、飼料摂取量および FCR において差が見られなかったことを報告しているが、産肉量が増加する肥育後期となる 28～42 日齢では観察されていない。本節の試験結果からは現代の高増体ブロイラーにおいて肥育後期の Lys の要求量が非常に高まる可能性があるものと推察された。さらに、本節の試験は、高 Lys 飼料中の Thr 含量の増加がとうもろこし-大豆油かす主体飼料の第三制限アミノ酸であるにもかかわらず、肥育後期のブロイラーの生産性能に対して悪影響を及ぼす可能性があることを示唆した。飼料中の Lys 含量に対する Thr の比率はブロイラー生産のために重要であり、21～42 日齢のブロイラーにおける最適な Thr/Lys 比は 0.68 と報告されている（Kidd ら, 1997, 2004; Everett ら, 2010; Mejia, 2012）。それゆえ、本節の試験では、飼料中の Thr および Lys の含有量について Thr/Lys 比=0.68 が適切な比であると仮定したため、高 Lys+Thr 区の増体重や FCR といった生産性能は対照区および高 Lys 区と比較して改善し得ると仮説を立てた。ところが高 Lys+Thr 区の増体重は対照区と比較して有意差は認められなかった。その一方で FCR については高 Lys 区および高 Lys+Thr 共に有意に低下した ($P < 0.05$)。この結果は、肥育後期における現代の高増体ブロイラーにとって、最適と仮説を立てた Thr/Lys 比（0.68）が高 Lys 飼料においては最大生産、特に増体重に対して適切な比率ではないことを示している。Thr は暑熱ストレスのかかる環境条件などや免疫応答の状況によっても要求量が変わることが知られているものの（Mohammad, 2013; Sigolo ら, 2017）、本試験で得られたこれらの知見は高 Lys 飼料と比較して、Thr/Lys 比を 0.68% とする Thr の強化ではブロイラーの増体重を改善することができないことを示した最初の証拠を提示した結果といえる。なお、高 Lys 飼料に対する Thr の用量反応性の更なる研究はブロイラーの最大生産をサポートする上で、肥育後期飼料中の Lys および Thr の最適含量を解明するために役立ち得るものと考えられる。

以上より、各アミノ酸間における適正比率は様々な研究から明らかにされてきているが、1 種のアミノ酸（本試験では Lys）を強化した際に必ずしもその比率に従って一方のアミノ酸（本試験では Thr）を強化すれば生産成績が改善するわけではないことが示唆された。しかしながら、本節の考察は生産指標から

の推測であり、Lys 強化により増体重および FCR の改善や、Thr を Thr/Lys 比の適正比まで高めたことによる増体重の低下の根拠については憶測の域を出ない。そこで次章では本節の試験で得られたニワトリの血液を用いてメタボローム解析を実施し、生産性能を改善する根底にあるメカニズムについて解明することを試みた。

表3-4-1 各試験区の総リジン, 総アルギニン, 総スレオニン、CPおよびMEの設計内容*

試験区	Lys, %	Arg, %	Arg/Lys比	Thr, %	Thr/Lys比	CP, %	ME, Mcal/kg
対照区	1.00	1.12	1.12	0.68	0.68	18.0	3.2
高Lys区	1.50	1.12	0.75	0.68	0.45	18.0	3.2
高Lys+Thr区	1.50	1.12	0.75	1.02	0.68	18.0	3.2

* ROSS308 Nutrition specifications 2007 (Aviagen) 掲載のアミノ酸指標を基準とした飼料を給与した区を対照区、対照飼料に有効Lysを50%強化した飼料給与区を高Lys区とし、さらに高Lys飼料にThrをThr/Lys比0.68になるよう強化した飼料給与区を高Lys+Thr区とした。

対照区の有効Lysおよび有効Thrの水準は、NRC (1994) の要求量を満たすように設計した。

CP水準が各区で同等となるようL-グルタミン酸により調整した。

Lys, リジン; Arg, アルギニン; Thr, スレオニン; NRC, National Research Council

表 3-4-2. 21～38 日 齢 に 給 与 し た 試 験 飼 料 *¹ の 配 合 率 、 組 成 お よ び 計 算 値

原 料 (%)	対 照 区	高 Lys 区	高 Lys+Thr 区
とうもろこし(基 材 含 む)	65.70	66.09	66.13
大 豆 油 か す (HP)	22.52	22.52	22.52
な た ね 油 か す	3.00	3.00	3.00
Y . G . (27 度)	4.35	4.35	4.35
炭 酸 カ ル シ ム (粉)	0.670	0.670	0.670
リン 酸 カ ル シ ム (ト リ カ ホ ス)	1.660	1.660	1.660
食 塩	0.160	0.160	0.160
L-リジン (98.5%)	0.120	0.750	0.750
DL-メチオニン (99%)	0.250	0.250	0.250
L-スレオニン (98.5%)	0.040	0.040	0.380
塩 化 コ リ ン	0.030	0.030	0.030
ビ ッ タ ミ ン ミ ネ ラ ル フ レ ミ ッ ク ス * ²	0.100	0.100	0.100
L-グ ル タ ミ ン 酸 * ³	1.400	0.380	-
粗 蛋 白 質 (%)	18.00	18.00	18.00
粗 脂 肪 (%)	6.10	6.20	6.20
粗 繊 維 (%)	2.00	2.00	2.00
粗 灰 分 (%)	4.80	4.80	4.80
ME(kcal/kg)	3,200	3,200	3,200
カ ル シ ム (%)	0.89	0.89	0.89
総 リ ン (%)	0.64	0.64	0.64
有 効 リ ン (%)	0.40	0.40	0.40
T. Lys(%)	1.00	1.50	1.50
T. Thr(%)	0.68	0.68	1.02
T. Arg(%)	1.12	1.12	1.12
A. Lys(%)	0.90	1.40	1.40
A. Thr(%)	0.62	0.62	0.96
A. Arg(%)	1.02	1.02	1.02
A. Met+Cys(%)	0.74	0.74	0.74

*¹ 高 Lys 区は Lys を対 照 区 の 1.5 倍 の 1.50%、高 Lys+Thr 区は Lys を対 照 区 の 1.5 倍 の 1.50% に し、同 様 に Thr を 1.02% (Thr/Lys=0.68) と し た 飼 料 の 給 与 区

*² ビ ッ タ ミ ン A 9,200IU; ビ ッ タ ミ ン D3 4,200IU; ビ ッ タ ミ ン E 15IU; メ ナ ジ ャ ン 2.9mg/kg; ビ ッ タ ミ ン B12 13μg/kg; コ リ ン 38mg; リ ボ フ ラ ビ ン 6.7mg; ナ イ ア シ ン 50mg; D-ビ ッ タ ミ ン 0.13mg; ビ ッ タ ミ ン C 3.4mg; マ ン ガ ン 130mg; 亜 鉛 100mg; 鉄 40mg; 銅 16mg; ヨ ウ 素 1.3mg

*³ CP が 18.0% に な る よ う に、L-グ ル タ ミ ン 酸 と と も ろ こ し を 置 き 換 え て 調 整 し た

※ T. Lys, 総 リジン; T. Thr, 総 スレオニン; T. Arg, 総 アルギニン; A. Lys, 有 効 リジン; A. Thr, 有 効 スレオニン; A. Arg, 有 効 アルギニン; A. Met+Cys, 有 効 メチオニン+シスチン

表 3-4-3. 各試験飼料の分析値

試験区	対照区	高 Lys 区	高 Lys+Thr 区
粗蛋白質 (%)	18.99	19.36	19.16
粗脂肪 (%)	5.80	5.95	6.11
粗繊維 (%)	2.80	1.42	2.22
粗灰分 (%)	4.53	4.63	4.62
水分 (%)	12.35	12.29	12.36
総リシン (%)	1.07	1.63	1.62
総スレオニン (%)	0.75	0.76	1.09
総アルギニン (%)	1.16	1.18	1.17
総メチオニン (%)	0.47	0.50	0.48
総メチオニン+シスチン (%)	0.71	0.75	0.73
総イソロイシン (%)	0.74	0.78	0.76
総バリン (%)	0.82	0.88	0.86
総ロイシン (%)	1.65	1.70	1.71
総フェニルアラニン	0.88	0.91	0.93
総チロシン	0.62	0.64	0.64
総ヒスチジン	0.49	0.50	0.51
総グリシン	0.75	0.78	0.78
総セリン	0.90	0.91	0.96
総プロリン	1.14	1.16	1.16
総グルタミン酸	4.91	4.06	3.69

すべての成分値は公定法にて分析した。

表3-4-4. 飼料中への高リジンおよび高リジン+スレオニンの水準強化がオスブロイラーの各日齢の体重および21～38日齢の各生産指標に及ぼす影響^{*1}

試験区 ^{*2}	対照区	高Lys区	高Lys+Thr区
体重(g/羽)			
21日齢 (試験開始時)	1010.8 ± 7.2	1012.7 ± 10.6	1013.6 ± 6.2
28日齢	1598.4 ± 95.9	1639.0 ± 65.2	1572.9 ± 48.4
35日齢	2269.6 ± 124.9 ^b	2447.9 ± 57.6 ^a	2290.2 ± 82.8 ^{ab}
38日齢 (試験終了時)	2517.6 ± 157.0	2687.7 ± 45.1 [†]	2550.9 ± 122.6
増体重 (g/羽)	1507.1 ± 145.5 ^b	1673.9 ± 39.9 ^a	1534.1 ± 124.1 ^{ab}
飼料摂取量 (g/羽)	3180.6 ± 292.4	3294.8 ± 65.1	3080.5 ± 210.0
FCR	1.686 ± 0.056 ^b	1.584 ± 0.044 ^a	1.609 ± 0.040 ^a

平均値±標準偏差, n=6

^{a-c}異なる肩文字を持つもの同士の間で有意差あり(P < 0.05)

[†]対照区に対して有意な傾向あり(P = 0.06)

*1 生産指標は各日齢における体重、各日齢間の増体重、飼料摂取量およびFCRを示した

*2 対照区は必須アミノ酸はROSS308 Nutrition specifications 2007 (Aviagen) を基準とした (Lys 1.00%、Thr 0.68%) 飼料を給与した区。高Lys区の飼料はLysを対照区の1.5倍となる1.50%、高Lys+Thr区はLysを対照区の1.5倍の1.50%かつThrを1.02% (Thr/Lys=0.68) とした飼料を給与した区を示す。対照区の有効Lysおよび有効Thrの水準はNRC (1994) の要求量を満たすように設計した。

Lys, リジン; Thr, スレオニン; NRC, The National Research Council; FCR, Feed Conversion Ratio

第 4 章

血漿メタボローム解析による FCR を改善する血中マーカーの探索

血漿メタボローム解析による FCR を改善する血中マーカーの探索

1. 緒言

育種改良されたブロイラーの最適飼養条件を導き出すには、第 2 章および第 3 章で記した実験手法を用いて、様々な条件で出荷までの試験を行い評価することがこれまでのブロイラー産業での通例であった。しかし、現代の高増体ブロイラーは育種改良のスピードが速まっており、鶏の飼養条件および栄養条件を見出し適合させる技術が追いつかない状況となってきた。そのため、ブロイラー産業界では増体性能や FCR を改善させるために、少ない飼養試験で最適な栄養要求量を素早く導き出し決定する手法の開発が望まれている。ブロイラーの生産性能を改善するために適正な栄養要求量を求める上では、現代の高増体ブロイラーがどのような栄養成分に反応するのか傾向を掴む必要がある。

本研究のこれまでの章では、現代の高増体ブロイラーが代謝エネルギー (ME) より飼料中のアミノ酸含量に反応し、FCR が変動することを明らかにした。さらには、FCR はアミノ酸の中でも Lys によく応答し、通常の 150% の含有量でも FCR を改善することが明らかとなった。

近年、血液中のメタボローム解析によって、様々な栄養による代謝異常や代謝調節を説明しようとする研究が数多く行われている (Ueland ら, 2015)。本研究において表現型に対する代謝全体の意味づけを行ったり、バイオマーカーを探索するにあたっては、ある栄養素を添加あるいは強化すると上昇 (低下) し、さらに別の栄養素を加えることで低下 (上昇) するような実験系によって明らかにする方法が適切であると考えられる。本論第 3 章第 4 節において示した高 Lys および高 Lys+Thr 飼料の給与試験の実験系はこの考え方に沿っており、Ueland らの実験系にもよく適合する。すなわち、高 Lys 区では対照区に対して FCR が改善し、増体重が増加したものの、その飼料に対して Thr を以前の研究で適切なレベルであるとされた含量まで添加した高 Lys+Thr 区では、FCR は上昇傾向にあり、増体重は減少した。よって、本実験系を用いて血中メタボローム解析を実施することにより、ブロイラーの FCR や増体重を改善する栄養素組

成を示すバイオマーカーとなり得る代謝産物等の成分が検出できる可能性があるものと推察される。そこで本章では当該試験で採取されたブロイラーの血液を用い、血中メタボロームの網羅的解析を試みた。仮に生産性と代謝の関連性を概観し、関連性の強い代謝産物（メタボライト）を推定することができれば、たとえば FCR の良好なブロイラーのメタボライトを血中マーカーとして用いることで、試験一度で得られる情報量が多く得られるようになり、ひいては試験の効率化や研究の精度を向上できる可能性がある。本章ではこれらの実用化を目指すことも目的の一つとして検証を進めた。

2. 材料および方法

(1) 鶏に給与した試験飼料の概要

本論第3章第4節で実施した試験の①対照区、②高 Lys 区および③高 Lys+Thr 区の鶏より採血を行った。ここで示した①対照区はとうもろこし-大豆油かす主体とし、必須アミノ酸含量を ROSS308 のマニュアル（Aviagen 社, 2007 年度版）推奨値の 100%（総 Lys 10.0g/kg および総 Thr 6.8g/kg）になるよう調整した飼料（CP18.0% および ME3.2Mcal/kg）を給与した区、②高 Lys 区は対照飼料に対し、Lys を 150%（総 Lys 15.0g/kg および総 Thr 6.8g/kg）とした飼料の給与区、③高 Lys+Thr 区は高 Lys 飼料に対し、Thr を Thr/Lys 比で 0.68（総 Lys 15.0g/kg および総 Thr 10.2g/kg）となるように調整した飼料の給与区とした。配合飼料の内容の詳細については第3章の表 3-4-2 に示した通り。

(2) 血液サンプルの処理

(1)で示した飼料を給与し、試験終了の38日齢時に各個体の翼下静脈より 23G × 1'の針と 2mL シリンジを用い採血を行った。採血した血液は直ちに血液抗凝固材として EDTA-2K が封入された真空採血管に移し、素早く反転混和した。EDTA 加真空採血管はハイブリッド高速冷却遠心機(Kubota 6200, 久保田商事, 東京, 日本)を用いて 4℃ 条件下、 $1,710 \times g$ (3,000rpm)で 15 分間遠心分離し、血漿（上清）を得た。その後、1.5mL 容のマイクロチューブにサンプルを小分けし、各血漿成分の分析に供するまで -80℃ で凍結保存した。

(3) 血漿のメタボローム解析

(2)で得た血漿サンプルはヒューマン・メタボローム・テクノロジー株式会社の研究所（HMT, 山形県鶴岡市）に測定を依頼し、CE-TOF/MS system (Agilent Technologies inc., Santa Clara, CA, USA)のカチオンモード、アニオンモードによる測定を実施した。カラムは fused silica capillary internal diameter 50 μ m x 80cm を用いた。検出されたピークは automatic integration software (MasterHands ver. 2. 16. 0. 15; Keio University, Tokyo, Japan)によって解析した。

なお、サンプルの調製、測定方法およびデータ処理・解析の詳細については以下 i ~ iii に記す（HMT 報告書（NOSAN-HMT-001HMT）参照）。

i . サンプルの調製

各個体から採取した血漿サンプルを冷凍した状態で HMT に送付した。HMT にて解凍後、対照区、高 Lys 区および高 Lys+Thr 区の各検体から各々 30 μ L を採取、混合して 3 検体とした。HMT の分析における内部標準物質の濃度が 10 μ M となるように調製した 450 μ L のメタノール溶液に、各検体 50 μ L の血漿を添加して攪拌した。これに 500 μ L のクロロホルムおよび 200 μ L の Milli-Q 水を加えて攪拌し、遠心分離（2,300 \times g, 4 $^{\circ}$ C, 5 分間）を行った。遠心分離後、水層を限外ろ過チューブ（ウルトラフリー MC PLHCC, HMT, 遠心敷きフィルターユニット 5kDa）に 400 μ L \times 1 本移し取った。これを遠心（9,100 \times g, 4 $^{\circ}$ C, 120 分間）し、限外ろ過処理を行った。ろ液を乾固させ、再び 25 μ L の Milli-Q 水に溶解して測定に供した。この処理サンプルを以後、試料と記す。

ii . 測定方法

試料の CE-TOF/MS による分析はカチオンモード、アニオンモードの測定を以下に示す条件にて実施した。得られたピーク郷土、形状から判断され、カチオンモードでの測定には 2 倍、アニオンモードでの測定には 5 倍に希釈した試料を用いた。

陽イオン性代謝物質（カチオンモード）

装置

Agilent CE-TOFMS system（Agilent Technologies 社） 1 号機

Capillary : Fused silica capillary i.d. 50 μm \times 80 cm

測定条件

Run buffer : Cation Buffer Solution (p/n : H3301-1001)

Rinse buffer : Cation Buffer Solution (p/n : H3301-1001)

Sample injection : Pressure injection 50 mbar, 10 sec

CE voltage : Positive, 27 kV

MS ionization : ESI Positive

MS capillary voltage : 4,000 V

MS scan range : m/z 50-1,000

Sheath liquid : HMT Sheath Liquid (p/n : H3301-1020)

陰イオン性代謝物質（アニオンモード）

装置

Agilent CE-TOFMS system (Agilent Technologies 社) 2 号機

Capillary : Fused silica capillary i.d. 50 μm \times 80 cm

測定条件

Run buffer : Anion Buffer Solution (p/n : I3302-1023)

Rinse buffer : Anion Buffer Solution (p/n : I3302-1023)

Sample injection : Pressure injection 50 mbar, 25 sec

CE voltage : Positive, 30 kV

MS ionization : ESI Negative

MS capillary voltage : 3,500 V

MS scan range : m/z 50-1,000

Sheath liquid : HMT Sheath Liquid (p/n : H3301-1020)

iii. データ処理および解析

・データ処理

CE-TOF/MS で検出されたピークは、自動積分ソフトウェアの MasterHands ver.2.16.0.15（慶應義塾大学開発）を用いて、シグナル/ノイズ (S/N) 比が 3 以上のピークを自動抽出し、質量電荷比 (m/z)、ピーク面積値、泳動時間 (Migration time: MT) を得た。得られたピーク面積値は以下の式^{†1}を用いて相対面積値に変換した。また、これらのデータには Na^+ や K^+ などのアダクトイオンおよび、

脱水、脱アンモニウムなどのフラグメントイオンが含まれているので、これらの分子量関連イオンを削除した。しかし、物質特異的なアダクトやフラグメントも存在するため、すべてを精査することはできなかった。精査したピークについて、 m/z と MT の値をもとに、各試料間のピークの照合・整列化を行った。

$$^{\dagger 1} \text{相対面積値} = (\text{目的ピークの面積値}) \div (\text{内部標準物質の面積値} \times \text{試料量})$$

・候補代謝物質検索

検出されたピークに対して m/z と MT の値をもとに HMT 代謝物質ライブラリおよび Known-Unknown ライブラリに登録された全物質との照合、検索を行った。Known-Unknown ピークの詳細については本論文において省略した。検索のための許容誤差は MT で $\pm 0.5 \text{ min}$ 、 m/z では $\pm 10 \text{ ppm}^{\dagger 2}$ とした。

$$^{\dagger 2} \text{質量誤差 (ppm)} = ((\text{実測値} - \text{理論値}) \div \text{実測値}) \times 10^6$$

・統計解析 (PCA, HCA)

主成分分析 (PCA) は SampleStat ver.3.14 (HMT 開発) を用いて行った。また、階層的クラスタリング解析 (HCA) および Heatmap 表記は PeakStat ver.3.18 (HMT 開発) を用いて行った両解析とも、データの前処理としてピーク単位での標準化 ($\mu = 0$, $\sigma = 1$) を行った。

(4) 血漿中のアミノ酸濃度の解析

血漿アミノ酸濃度の解析は個々のニワトリから得られた血漿を用いて分析した。 -80°C で保存していた血漿サンプルは氷上で解凍し、等量の 3% スルホサリチル酸溶液を添加し、試験管ミキサーを用いて約 10 秒間攪拌混和後、ハイブリッド高速冷却遠心機 (Kubota 6200, 久保田商事, 東京, 日本) を用いて 4°C 条件下、 $1,710 \times g$ (3,000rpm) で 1 分間遠心分離することで除タンパク質処理を行った。その後上清を採取し機器に供試する前まで -30°C で再び凍結保存した。除タンパクした血漿サンプル中の遊離アミノ酸濃度は、Imanari ら (2007) による方法に準じ、アミノ酸自動分析計 (JLC-500/V; JEOL, Tokyo, Japan) を用いて測定した。カラムは multi-segment tandem packed column (JC-500AC4016, Li type, 4mm

diameter x 160mm; JEOL, Tokyo, JAPAN)を用いた。検出波長は 440nm および 570nm で測定した。

(5)血漿中のセロトニン濃度の解析

血漿のメタボローム解析の結果、高 Lys 区の血漿セロトニン（5-ヒドロキシトリプタミン, 5-HT）濃度が高 Lys+Thr 区の 2 倍以上となったことから、(2)で調製した血漿サンプルについて個体毎の詳細な分析を行った。血液中の 5-HT レベルは ELISA キットを用い、製造業者のガイドラインに従って測定した（BAE-8900; ImmuSmol SAS, Pessac, France）。

(6)統計処理

SPSS アプリケーションソフトウェアパッケージを統計計算に使用した（PASW Statistics 18.0, IBM, NY10504）。複数の比較のための群データは Tukey-kramer 検定による一般線形モデル（GLM）の手法を用いた分散分析（ANOVA）によって解析した。各々の結果は平均値±標準偏差(SD)として表現した。統計的有意差は $P < 0.05$ の値として解釈された。加えて、本研究で測定した因子間の相関分析を行った。

3. 結果

(1) 血漿中の遊離アミノ酸濃度

高 Lys 飼料もしくは高 Lys+Thr 飼料を給与されたニワトリの血漿 Lys 濃度は対照区と比較して高く（ $P < 0.05$ ）、高 Lys 飼料を給与されたニワトリの血漿アルギニン（Arg）濃度は対照区と比較して低い傾向があった（ $P = 0.074$ ）（表 4-1）。高 Lys+Thr 飼料を給与されたニワトリの血漿 Thr 濃度は他の区よりも高かった（表 4-1）。ニワトリの血漿中におけるその他の遊離アミノ酸濃度について 3 つの区の間には有意な差は観察されなかった。

(2) 血漿中のメタボローム解析

血漿代謝産物に対する高 Lys 飼料および高 Lys+Thr 飼料の効果を明らかにするために、CE-TOF/MS system を用いて代謝産物のレベルを決定した。各試験群合わせて血漿中に計 149 種類の化合物が検出され、この結果を up-regulated (> 1.2 倍)、down-regulated (< 0.8 倍) および unchanged ($0.8-1.2$) の 3 つのグループに分け、表 4-2 に示した。本研究では、血漿の代謝産物のうち、試験区間で 1.5 倍以上または 0.7 倍以下に変化した分子を抽出し、表 4-3 に示した。2-アミノアジピン酸ならびにピペコリン酸のような一般的な Lys 代謝産物は、高 Lys 飼料または高 Lys+Thr 飼料を与えたブロイラーの血漿中で対照区に比べて増加した。Arg、オルニチン、シトルリン、尿素および尿酸を含む尿素サイクルに関連する代謝産物は、高 Lys 区で対照区のものと比較して減少した。クレアチン経路の代謝産物や体タンパク質の分解指標である 3-メチルヒスチジンは、高 Lys 飼料または高 Lys+Thr 飼料の給与によって変化した。血漿セロトニン濃度について高 Lys 区で増加した一方、高 Lys+Thr 区で減少するとの特徴的な変化が検出された (表 4-3)。この血漿セロトニン濃度の増減について詳細な情報を得るため、ELISA 法によって個体毎の血漿濃度を確認した。その結果、高 Lys 飼料を与えたニワトリの血漿中のセロトニン含量は、対照区または高 Lys+Thr 区のものと比較して有意に増加した ($P < 0.05$) (図 4-1)。

(3) セロトニンと他の因子の間の相関分析

血漿セロトニン濃度と増体重、飼料摂取量または FCR との相関分析のために、同様の実験を行い、これらの相関を分析した。その結果、セロトニンレベルと FCR との間には負の相関が見られた ($P < 0.008$) (図 4-2)。また、本試験結果と同様、他の因子のいずれかと血漿セロトニン濃度との間に有意な相関は見出せなかった。

4. 考察

本章における目的は第 3 章 4 節で明らかにした高 Lys 飼料および高 Lys+Thr 飼料を現代の高増体ブロイラーに給与したときの FCR に対する効果を、血中代謝産物の動態によって明らかにすることにあった。さらには、血中代謝産物と各生産指標の間に相関性が認められれば、その代謝産物をブロイラーの肥育後

期飼料に対する生産指標改善の血中バイオマーカーの候補として考えることができる。もし、本試験で生産指標改善のバイオマーカーが明らかとなれば、その推定には血液を用いるため、非破壊的な検討が可能となり、成長中のブロイラーの各肥育段階での栄養成分とのマッチングも可能になるかもしれない。そこで本章では、給与試験によってニワトリの体内でどのような変化が起こったのかを血中メタボロームの網羅的解析によって明らかにし、各生産指標を改善し得る血中バイオマーカーの探索のため、それらと相関を持つ低分子代謝産物の探索を行った。

従来から、血中遊離アミノ酸濃度を測定することでニワトリの状態を概観する手法は存在していた。たとえば、アミノ酸インバランスにおいて、第二制限アミノ酸を添加した場合には、血中の第一制限アミノ酸濃度が減少し、添加した第二制限アミノ酸の濃度が著しく増大する。このような血中アミノ酸濃度は飼料摂取量を低下させることが知られている。血中アミノ酸濃度の変動は脳で検出され、脳からの信号で飼料摂取量の低下が起きるとされる（アミノ酸飼料学，チクサン出版社）。他にも一般的知見から予測された代謝物質を測定して論じる研究はあるが、畜産・家禽学の研究において、バイアスがかからないよう代謝産物を網羅的に分析して仮説発見に繋げるメタボロミクスの見地から調査された報告は少ない。

本章の結果から、高 Lys 飼料または高 Lys+Thr 飼料の供給によって多くの血中代謝産物に変化したが、特徴的な代謝産物としてセロトニン（5-ヒドロキシトリプタミン，5-HT）が検出された。哺乳類では、中枢神経系と末梢系の2つの独立したセロトニンの組織作動系が存在することが一般に知られていることから、各々の作動系との関連性について検討した。まず、セロトニンの中枢神経系の作用としては、ヒトでは主に生体リズム、神経内分泌、睡眠、性欲、食欲など多岐に関与するとされている（Banes ら，1999）。また、哺乳動物において摂食行動および肥満に影響を及ぼすことが報告されており（Leibowitz と Alexander, 1998）、ニワトリにおける知見としては、ヒナの視床下部へセロトニンを投与すると飼料摂取量が増加することが報告されている（Tachibana ら，2001）。これらの反応を引き起こすセロトニンは脳幹の縫線核でトリプトファンから合成され、脳内の神経伝達物質として働くモノアミン類として知られているが、血液脳幹門を通過できないため、腸で生成されたセロトニンが脳のニューロンに直接作用する可能性はないものと考えられている。本試験結果からは

高 Lys 区および高 Lys+Thr 区における血液中のトリプトファン濃度の上昇は確認されなかった（検出されたが変動が小さかったため表 4-3 にデータを示さず）。この結果からは、脳幹においてセロトニンの合成量が増加して作用した可能性は否定できないものの、中枢神経系における強い働きは低いものと推察された。一方、末梢系におけるセロトニンの役割としては、**Rapport** ら（1948）によって血小板から単離され、血管を収縮させる作用を持つ物質として名付けられた分子（**Rapport** ら, 1948; **Rapport**, 1949）であることから血管の緊張を調整することが知られている。また、セロトニンと名付けられる以前に、**Erspamer** ら（1937）によって消化管の中から分離されたエンテラミンはセロトニンと同一分子であることが判り、消化管壁の収縮を促進する化合物としても知られている。末梢系ではこれら 2 つの役割に関する研究が中心に進められ、強力な肺血管収縮薬（**Boe** ら, 1980）および平滑筋分裂促進因子（**Nemecek** ら, 1986; **Fanburg** と **Lee**, 1997）としての機能を持つことなどが報告されているが、それらにおけるメカニズムについては未解明な部分も多い。ニワトリにおける知見としては、血漿セロトニン濃度が血管収縮の度合いの指標に出来る可能性が示されており（**Chapman** ら, 2008）、ブロイラーの肺動脈高血圧症の評価において大きな臨床的意義を持つことに言及されている。これらの主な働き以外における末梢のセロトニンの役割としては、グルコースおよび脂質代謝を調節する機能が報告されており（**Kim** ら, 2011; **Watanabe** ら, 2016）、肥満において重要な役割を果たす可能性が示唆されている。しかしながら、末梢のセロトニン、特に血漿セロトニンがブロイラーにおけるグルコースおよび脂質代謝のみならず、FCR にも影響するとの報告はない。さらに最近の研究では、慢性の予測不能なストレス環境下ではブロイラーの腸管のバリア機能が破壊されるが、飼料中にトリプトファンを補給することで腸管に対する負の効果が軽減された結果、FCR が改善したことが示されている（**Yue** ら, 2017）。同報告では、同時にトリプトファンの保護作用がセロトニン作動系に関連したことを示している。セロトニンは腸の恒常性に関与する重要な腸粘膜シグナル伝達分子であり、セロトニンシグナル伝達の変化は腸の炎症状態を含む様々な胃腸障害において観察されるが（**Keszthelyi** ら, 2009, 2014; **Camillrti**, 2009; **Spiller**, 2008）、腸疾患におけるセロトニンの効果は一貫していないことも多い。このように、トリプトファン代謝産物、特にセロトニンの腸内生理学における役割について示唆した報告はあるものの（**Gershon** ら, 2007; **Keszthelyi** ら, 2009）、実際の作用機序については

明らかにされていないことも多く、研究が進められている。本章の結果からは、高 Lys 飼料を給与したニワトリにおいて高血漿セロトニン濃度が検出され（表 4-3, 図 4-1）、セロトニン濃度は FCR と負の相関が見られた（図 4-2）。これらの結果は、血漿セロトニン濃度が肥育後期におけるブロイラーの FCR に関与していることを示唆している。しかしながら、先述の通り、本試験のニワトリの血漿中においてセロトニンの基質であるトリプトファン濃度は他の試験区と比較して高 Lys 区で変化が見られなかった（表 4-3 にデータを示さず）。Yue ら（2017）の報告のようにストレス指標の測定は行っていないものの、前駆体である L-トリプトファンを供給することによって血液中のトリプトファン濃度が上昇し、それに依存した形で応答した作用機序と同じものとは考え難い。セロトニンは腸の神経伝達、内因性腸反射の発生と伝播、そして腸から脳へのシグナル伝達において重要な役割を果たしており（Gershon ら, 2005）、近年では正常および異常な消化管機能に対するセロトニンの寄与について理解することの重要性が高まっている。本試験による血漿セロトニンの上昇も生体において何らかの役割を果たしているものと推察されるが、高 Lys 飼料を給与したニワトリにおいて血漿セロトニン濃度が上昇したメカニズムは不明であり、どのようにセロトニン作動系に影響を及ぼしたかも定かではない。そのため、FCR と負の相関が見られた事由についても推測の域を出ることはできなかった。しかしながらこの結果は、ブロイラーにおける末梢セロトニンの新たな代謝的役割を示すものであると共に、血漿セロトニン濃度が現代の高増体ブロイラーにおいて、肥育後期の FCR を改善するためのバイオマーカーになり得る可能性を示唆する新たな知見である。

本研究では、2-アミノアジピン酸およびピペコリン酸などの Lys 代謝産物が高 Lys 飼料および高 Lys+Thr 飼料を給与したニワトリの血液中で増加した。Watanabe ら（2015）は、14 日齢から 10 日間、高 Lys 飼料を与えたニワトリの浅胸筋においても、変化の倍率は血液中よりも高いとの違いはあったものの Lys の代謝産物に同様の変化が観察されたことを報告している。ただし、同報告では筋肉中において Lys の代謝経路のうち主な経路（サッカロピン経路）上にあるサッカロピンの濃度が大きく上昇することが示されていたが、本試験における各区の血液中には検出されなかった。サッカロピンならびにピペコリン酸は各々別の代謝経路から 2-アミノアジピン酸に代謝されるが、第 2 の代謝経路（ピペコリン酸経路）上にあるピペコリン酸のみが検出された点については

興味深い結果であるといえる。また、本試験の高 Lys 飼料および高 Lys+Thr 飼料の給与群では、体タンパク質の分解指標である 3-メチルヒスチジン (3-MeHis) が血液中において減少する傾向が見られた。先述の Watanabe らの報告でも高 Lys 飼料を給与したニワトリの浅胸筋において 3-MeHis 濃度が減少しており、Lys の多給が筋肉の分解を抑制した可能性が示唆される。

本試験ではマニュアル推奨量の 150% と高 Lys 飼料をブロイラーに給与してその反応を調査したが、ニワトリにおいて高 Lys 飼料の摂食によって飼料摂取量が低下する Lys-Arg 拮抗作用が誘導されることはよく知られている (Austic と Scott, 1975)。アミノ酸の相互作用の一つである Lys-Arg 拮抗作用は、ヒナを用いた試験によって飼料摂取量の低下のほかにも、グリシン・アミジノ・トランスフェラーゼ活性の低下、腎臓アルギナーゼによる Arg 分解の増加および尿中 Arg の増加などが起こると考えられている (Jones ら, 1967; Austic と Nesheim, 1970; Wang と Nesheim, 1972)。また、ブロイラーの肥育後期の飼料における Arg 含量当たりの Lys の最適比は 1.18 との報告がある (Labandan ら, 2001)。したがって、高 Lys 飼料は、Lys-Arg 拮抗作用によってブロイラーの生産性能に悪影響を及ぼす可能性が高いものと考えられた。しかしながら、ROSS308 のマニュアル (2007) 推奨値の 150% (Lys/Arg 比 1.47) の Lys 含有量とした高 Lys 飼料給与群のニワトリの飼料摂取量は対照飼料給与群と比較してむしろ増加傾向が見られ、増体重および FCR は改善した (表 3-4-4)。Nesheim (1972) によると 2 種類の白色レグホーン種を用いて Arg 要求量を求める試験を行った際、Lys 過剰によって腎臓のアルギナーゼ活性が数倍に高まり、オルニチンと尿素に分解される Arg の量を著しく増加させたことを示している。しかしながら、品種の系統が異なることで Lys の代謝能力に差があり、反応が異なる可能性も同時に報告している。本試験結果からは、Arg、オルニチン、シトルリン、尿素および尿酸を含む尿素サイクルに関連する代謝産物は、対照区と比較して高 Lys 区で減少する傾向が見られたが (表 4-3)、生産成績に影響する Lys-Arg 拮抗作用は、ROSS308 マニュアル (2007) の 150% に値する高 Lys 飼料を給与しても問題がないことが示唆された。また、同じ鳥類でも系統によって Lys 代謝の能力が異なることが示唆された報告があることから、現代の高増体ブロイラーでは Lys の代謝能力が上昇している可能性も示唆される。

結論として、本研究で使用された Lys の飼料添加、特に ROSS308 ラインのマニュアルが推奨するレベルの 150% とした濃度では、現代の高増体ブロイラー

の肥育後期における生産性能が向上し、高 Lys 飼料が家禽産業にとって有益な成分であることが示された。対照的に、高 Lys 水準飼料に対する Thr の適正比率 (Thr/Lys 比 0.68) までの強化は高 Lys 含量の肥育後期飼料において産肉性を改善するためには必ずしも機能しない可能性が推察された。さらに、本研究の新規的な知見は、血漿セロトニン濃度がブロイラーの FCR に関与していること、あるいは飼料摂取量の調節に影響を与えている可能性を示し、血漿セロトニン濃度がニワトリの FCR 改善のための新規の血中バイオマーカーとして使用できる可能性を示唆した。

表4-1. 38日齢時におけるブロイラーの血漿遊離アミノ酸濃度に対する高Lys飼料および高Lys+Thr飼料の効果 (nmol/mL 血漿).

	対照区		高Lys区		高Lys+Thr区	
Thr	401.3 ±	72.9 ^A	334.9 ±	103.1 ^A	2585.0 ±	772.4 ^B
Ser	486.3 ±	50.3 ^a	551.8 ±	118.8 ^{ab}	673.6 ±	89.8 ^b
Glu	174.1 ±	18.8	185.2 ±	46.3	134.8 ±	14.5
Gln	1151.3 ±	180.6	1348.1 ±	152.9	1378.5 ±	96.6
Gly	592.3 ±	42.0	557.1 ±	136.6	613.7 ±	76.7
Ala	1074.1 ±	205.4	1068.4 ±	234.6	991.0 ±	159.5
Val	135.4 ±	23.1	135.4 ±	26.3	135.7 ±	16.5
Met	82.5 ±	8.4	98.7 ±	13.1	94.9 ±	19.8
Cys	50.5 ±	2.6	49.0 ±	3.6	48.9 ±	7.8
Ile	65.9 ±	15.2	70.4 ±	19.9	67.4 ±	11.9
Leu	275.0 ±	33.5	257.5 ±	33.5	277.8 ±	23.8
Tyr	225.6 ±	51.4	269.7 ±	40.6	267.1 ±	41.6
Phe	133.0 ±	16.7	119.0 ±	17.4	121.5 ±	8.0
His	86.9 ±	46.9	46.2 ±	12.2	52.6 ±	3.6
Lys	113.8 ±	73.9 ^A	636.9 ±	177.5 ^B	547.6 ±	64.9 ^B
Arg	313.0 ±	102.3	199.6 ±	72.7 [†]	208.2 ±	48.2

平均値 ± 標準偏差, 異なる肩文字を持つもの同士に有意差あり
(A, B $P < 0.01$, or a, b $P < 0.05$).

† 対照区と比較して低い傾向あり ($P = 0.074$).

Ala, alanine; Arg, arginine; Cys, Cystine; Gln, glutamine; Glu, glutamic acid; Gly, glycine; His, histidine; Ile, isoleucine; Leu, leucine; Lys, lysine; Met, methionine; Phe, phenylalanine; Ser, serine; Thr, threonine; Tyr, tyrosine; Val, valine.

表4-2. 倍数変化によるプロイラーの検出された血漿中の代謝産物の分類.

	高Lys区 vs. 対照区 のfold-change			総計	高Lys+Thr区 vs. 対照区 のfold-change			総計	高Lys+Thr区 vs. 高Lys区 のfold-change			総計
	< 0.8 (down regulated)	0.8-1.2 (unchanged)	1.2 < (up regulated)		< 0.8 (down regulated)	0.8-1.2 (unchanged)	1.2 < (up regulated)		< 0.8 (down regulated)	0.8-1.2 (unchanged)	1.2 < (up regulated)	
代謝産物の数	21	93	35	149	32	92	22	146	36	99	13	148
代謝産物に占める割合(%)	14.1	62.4	23.5	100	21.9	63.0	15.1	100	24.3	66.9	8.8	100

21-38日齢において、プロイラーヒナに对照飼料、高Lys飼料および高Lys+Thr飼料を飼餌し、38日齢時に採血し血漿を得た。
すべてのサンプルは試験区毎にグループした.

代謝産物は3つのグループに分類した.: up-regulated (>1.2 倍), down-regulated (< 0.8 倍) および unchanged (0.8 - 1.2 倍).
fold-change, 試験区間毎の各代謝産物の血漿中濃度の変化を示した.

表4-3. 38日齢におけるブロイラーの血中に検出された代謝産物に対する高Lys飼料もしくは高Lys+Thr飼料の効果.

Compound name	Relative Area			Comparative analysis (fold-change)		
	Control	High Lys	High Lys+Thr	High Lys vs. control	High Lys+Thr vs. control	High Lys+Thr vs. high Lys
Lysine metabolites						
Lysine	3.49 x10 ⁻²	2.05 x10 ⁻¹	1.74 x10 ⁻¹	5.9	5.0	0.8
2-Aminoadipic acid	2.98 x10 ⁻⁴	9.04 x10 ⁻⁴	7.53 x10 ⁻⁴	3.0	2.5	0.8
Pipecolic acid	1.26 x10 ⁻³	2.98 x10 ⁻³	2.91 x10 ⁻³	2.4	2.3	1.0
N6-Acetyllysine	1.41 x10 ⁻³	3.50 x10 ⁻³	3.76 x10 ⁻³	2.5	2.7	1.1
N-Acetyllysine	2.77 x10 ⁻⁴	4.85 x10 ⁻⁴	5.25 x10 ⁻⁴	1.8	1.9	1.1
Carboxymethyllysine	3.36 x10 ⁻⁴	3.06 x10 ⁻⁴	3.83 x10 ⁻⁴	0.9	1.1	1.3
Metabolites increased more than ≥ 1.5 fold-change						
Specifically in high Lys vs. control						
Serotonin	2.10 x10 ⁻⁴	8.89 x10 ⁻⁴	6.47 x10 ⁻⁵	4.2	0.3	0.1
Ethanolamine	1.05 x10 ⁻³	1.63 x10 ⁻³	1.18 x10 ⁻³	1.5	1.1	0.7
Specifically in high Lys+Thr vs. control						
Threonine	9.63 x10 ⁻²	8.46 x10 ⁻²	5.66 x10 ⁻¹	0.9	5.9	6.7
2-Hydroxy-4-methylvaleric acid	2.38 x10 ⁻⁴	1.78 x10 ⁻⁴	3.47 x10 ⁻⁴	0.7	1.5	2.0
Common high Lys and high Lys+Thr vs. control						
β -Alanine	7.13 x10 ⁻³	1.55 x10 ⁻²	1.11 x10 ⁻²	2.2	1.6	0.7
Homocitrulline	7.33 x10 ⁻⁵	1.08 x10 ⁻⁴	1.12 x10 ⁻⁴	1.5	1.5	1.0
Metabolites increased less than ≤ 0.7 fold-change						
Specifically in high Lys vs. control						
2-Hydroxy-4-methylvaleric acid	2.38 x10 ⁻⁴	1.78 x10 ⁻⁴	3.47 x10 ⁻⁴	0.7	1.5	2.0
Ornithine	5.29 x10 ⁻³	3.90 x10 ⁻³	4.30 x10 ⁻³	0.7	0.8	1.1
Citrulline	1.59 x10 ⁻³	1.15 x10 ⁻³	1.44 x10 ⁻³	0.7	0.9	1.3
Uric acid	1.93 x10 ⁻²	1.39 x10 ⁻²	1.52 x10 ⁻²	0.7	0.8	1.1
2-Hydroxyglutaric acid	3.20 x10 ⁻⁴	2.28 x10 ⁻⁴	2.11 x10 ⁻⁴	0.7	0.7	0.9
Arginine	1.19 x10 ⁻¹	8.04 x10 ⁻²	8.18 x10 ⁻²	0.7	0.7	1.0
Lauric acid	1.73 x10 ⁻³	1.08 x10 ⁻³	1.28 x10 ⁻³	0.6	0.7	1.2
Taurocholic acid	4.37 x10 ⁻⁴	2.41 x10 ⁻⁴	4.28 x10 ⁻⁴	0.6	1.0	1.8
3-Methylhistidine	1.60 x10 ⁻²	7.55 x10 ⁻³	6.52 x10 ⁻³	0.5	0.4	0.9
Specifically in high Lys+Thr vs. control						
N-Acetylmuramic acid	2.69 x10 ⁻⁴	2.29 x10 ⁻⁴	1.84 x10 ⁻⁴	0.8	0.7	0.8
Sulfotyrosine	1.61 x10 ⁻⁴	1.37 x10 ⁻⁴	1.08 x10 ⁻⁴	0.9	0.7	0.8
Ectoine	4.88 x10 ⁻⁴	4.46 x10 ⁻⁴	3.21 x10 ⁻⁴	0.9	0.7	0.7
γ -Butyrobetaine	8.05 x10 ⁻⁴	7.43 x10 ⁻⁴	5.19 x10 ⁻⁴	0.9	0.6	0.7
Diethanolamine	3.64 x10 ⁻⁴	3.50 x10 ⁻⁴	2.30 x10 ⁻⁴	1.0	0.6	0.7
Nicotinamide	9.74 x10 ⁻⁴	9.71 x10 ⁻⁴	5.95 x10 ⁻⁴	1.0	0.6	0.6
Hypoxanthine	1.32 x10 ⁻³	1.50 x10 ⁻³	7.77 x10 ⁻⁴	1.1	0.6	0.5
Taurine	1.30 x10 ⁻²	1.50 x10 ⁻²	6.25 x10 ⁻³	1.2	0.5	0.4
3-Methylhistidine	1.60 x10 ⁻²	7.55 x10 ⁻³	6.52 x10 ⁻³	0.5	0.4	0.9
Serotonin	2.10 x10 ⁻⁴	8.89 x10 ⁻⁴	6.47 x10 ⁻⁵	4.2	0.3	0.1
Common to high Lys and high Lys+Thr vs. control						
Dyphylline	3.56 x10 ⁻³	2.64 x10 ⁻³	1.69 x10 ⁻³	0.7	0.5	0.6
Glyceric acid	2.00 x10 ⁻³	1.46 x10 ⁻³	1.18 x10 ⁻³	0.7	0.6	0.8
Glycerol	1.20 x10 ⁻²	8.64 x10 ⁻³	4.70 x10 ⁻³	0.7	0.4	0.5
Creatine	1.35 x10 ⁻²	9.69 x10 ⁻³	5.39 x10 ⁻³	0.7	0.4	0.6
Carnitine	2.30 x10 ⁻³	1.61 x10 ⁻³	1.20 x10 ⁻³	0.7	0.5	0.7
Xanthine	3.64 x10 ⁻⁴	2.42 x10 ⁻⁴	2.09 x10 ⁻⁴	0.7	0.6	0.9
2-Hydroxyisobutyric acid	3.78 x10 ⁻⁴	2.56 x10 ⁻⁴	3.68 x10 ⁻⁴	0.7	1.0	1.4
Urea	8.06 x10 ⁻³	4.83 x10 ⁻³	4.31 x10 ⁻³	0.6	0.5	0.9
Histidine	2.73 x10 ⁻²	1.30 x10 ⁻²	1.45 x10 ⁻²	0.5	0.5	1.1
Metabolites increased more than twice in high Lys+Thr vs. high Lys						
Threonine	9.63 x10 ⁻²	8.46 x10 ⁻²	5.66 x10 ⁻¹	0.9	5.9	6.7
Metabolites decreased to less than half in high Lys+Thr vs. high Lys						
Taurine	1.30 x10 ⁻²	1.50 x10 ⁻²	6.25 x10 ⁻³	1.2	0.5	0.4
Serotonin	2.10 x10 ⁻⁴	8.89 x10 ⁻⁴	6.47 x10 ⁻⁵	4.2	0.3	0.1

21-38日齢において、ブロイラーヒナに对照飼料、高Lys飼料および高Lys+Thr飼料を給餌し、38日齢時に採血し血漿を得た。

すべてのサンプルは試験区毎にプールした (n = 6)。

Fold-change はreactive areas (検出ピーク) の比率を示した(2試験区間毎の各化合物)。

Up-regulated もしくは down-regulated の代謝産物は、一般的なリジン代謝産物は別途に分けた上で示した。

Control, 对照区; high Lys, 高Lys区; high Lys+Thr, 高Lys+Thr区。

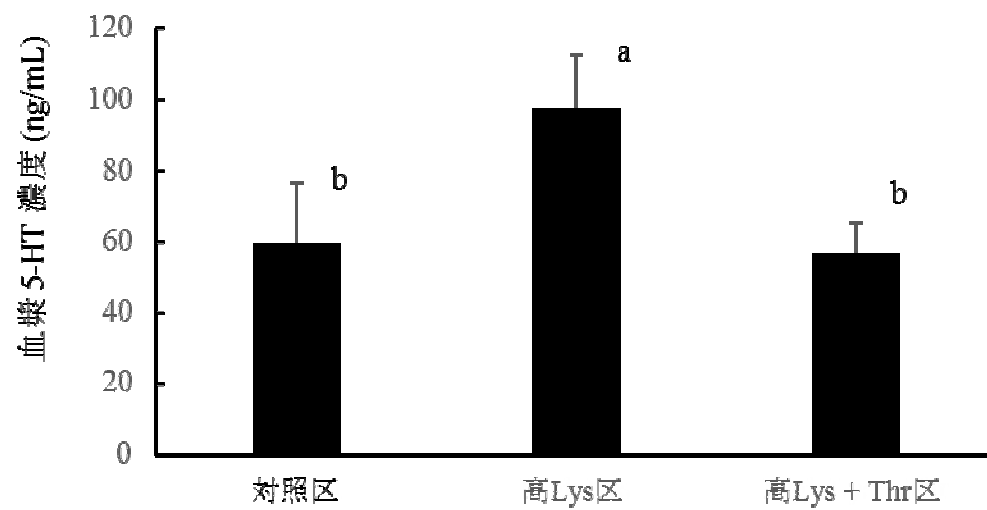


図 4-1. 38 日齢時におけるブロイラーの血漿中のセロトニン (5-hydroxytryptamine, 5-HT) 濃度に対する高 Lys 飼料 および高 Lys+Thr 飼料の給餌による効果.

平均値±標準偏差 (n=6).

ab 異なる肩文字を持つもの同士で有意差あり (P < 0.05).

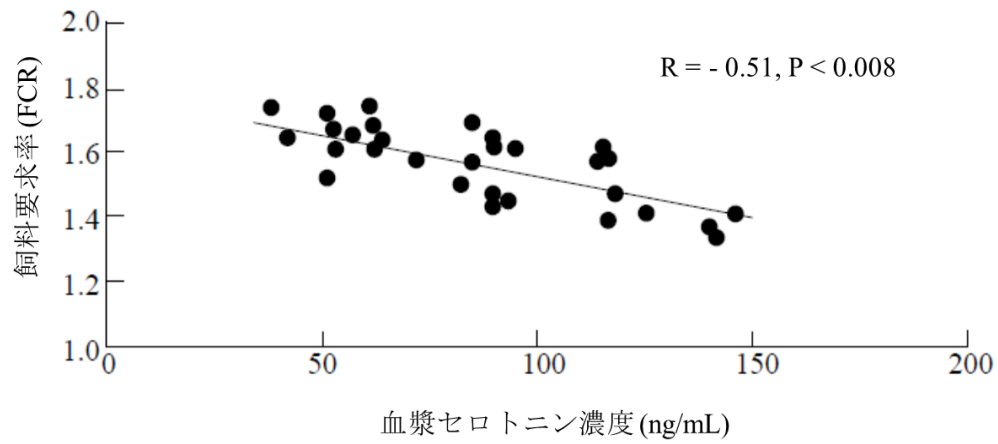


図 4-2. 38 日齢時におけるブロイラーの血漿セロトニン
および飼料要求率 (FCR) の間における相関分析.

実験の処置は材料および方法において示した (n=30).

第 5 章

総 合 考 察

総合考察

本研究の題材であるブロイラーは、安価な動物性タンパク質の供給源として現代の食生活には欠かせないものとなっており、鶏肉の需要や生産量は世界的に右肩上がりです。世界的な人口増加の流れの中、鶏肉を安定的に生産するためには、より少ない穀物量によって多くの産肉性を向上させる手法が一番に望まれており、羽当たりの飼料給与量の削減による飼料要求率（FCR）の改善や可食部の歩留り改善の重要性が年々増している状況にある。本研究はブロイラー産業界からの FCR の改善要望に応えるため、現代の高増体ブロイラーに対する配合飼料の栄養組成において適切な ME およびアミノ酸レベルを旧来から行われている飼養試験によって明らかにし、さらにその迅速な評価系を確立することを目的として実行した。その結果、現代の高増体ブロイラーの FCR を改善するためには、従来、有効な手段と考えられてきた飼料中の ME 強化よりも必須アミノ酸を主としたアミノ酸のバランスを考慮したバランスタンパク質（Balance Protein, BP）を強化した方が応答性は強く、効果的であることが示唆された。また、BP を構成する必須アミノ酸の中でも特にリジン（Lys）への応答が大きいことを明らかにし、さらに Lys 強化において FCR と関係する血中因子を網羅的なメタボローム解析によって探索した結果、セロトニンとの間に高い相関があることを見出した。血漿セロトニン濃度が増加した理由は定かではないが、本研究は、末梢でのセロトニンの新たな代謝的役割を示すと共に、肥育後期の現代の高増体ブロイラーにおいて、血漿セロトニン濃度が FCR を改善するためのバイオマーカーになり得るとの新たな知見としてその可能性を提示した。

本研究では第 2 章で、これまでの一般的な栄養学・飼養学的知見が現代の高増体ブロイラーの生産成績に符合するかを確認した。従来、鳥類は飼料中の代謝エネルギー（ME）含量に反応し、飼料の食下量を調節しているものと考えられており（Payne, 1967）、高 ME 飼料を給与することで FCR を改善することに

有効であると考えられていた。しかしながら、飼料中のアミノ酸含量を高めるに伴い飼料摂取量が減るが、体重は増加するとの報告（Petri ら, 2007）に加え、育種改良が進んだことにより、形質選抜がされていく中で鶏の脳の働きが変わり、食下量の制限因子が変化しているとの報告（Richards, 2003）からは、現代のブロイラーの ME と粗タンパク質（CP）への反応が異なっていることが示唆されていた。そこで、ME と CP への反応性について検証したところ、ME 強化飼料と比較して、CP 強化飼料の方がニワトリの飼料摂取量は減るが増体重は向上する傾向が見られ、結果として FCR を改善した。この結果からブロイラーのタンパク質要求量が高まっているものと推察され、ニワトリの食下量にも影響を及ぼす可能性が示唆された。さらに本論文では、配合飼料中のタンパク質の質、すなわち必須アミノ酸のバランスを整えた BP が重要であること示し、単純に飼料中の CP を高く設計しても必須アミノ酸の組成を考慮しない場合、生産性能の改善において効果が低くなることを示した。また、FCR の改善には BP 水準の強化が有効であるが、水準を高めるにつれ ME の要求量も変化することを明らかにした。この関係を明確にするため、BP 水準と ME 水準を各 4 段階とした飼料の網羅的な給与試験を実施し、等高線を用いた各生産指標の推定図の作図によって、BP および ME 水準に対する FCR および増体重への反応を判り易く視覚化して俯瞰した。当推定図からは肥育後期のブロイラーの FCR は BP に強く反応し、高 BP 条件下においては ME 強化の効果も高まるものと推察された。一方、生体重においても BP 水準の強化に伴い増加する傾向が見られたが、ME 水準に対する反応の規則性は見受けられなかった。商業の生産農場では増体改善のために飼料中の ME を強化する取り組みが行われることが散見されるが、本結果からは必ずしも増体改善には至らない可能性がある。これは BP 水準および ME 水準の強化による飼料摂取量の低減が関係しているものと考えられ、増体改善には採食性を落とさない手立てが必要になるものと推察された。なお、当推定図は一般に学術用途で用いられている図ではないが、段階的に細やかな試験区を設定することで反復の少なさをカバーできるメリットがあり、各生産指標に対する反応の傾向を予測する上でもブロイラー飼料の栄養設計にとって有益であると思料する。また、定期的な試験の実施により育種改良の変遷を追うための指標としても活用できる可能性があり、新しい指標図として提案したい。

現代の高増体ブロイラーにとって、BP 水準の強化は FCR の改善にとって有

効である可能性を示したが、必須アミノ酸すべてを強化すると結果的に CP 設計値も高まることとなる。余剰な窒素源はその処理のためにエネルギーを要し、生産効率を悪化させる可能性がある。そのため、BP を突き詰める上ではその組成、すなわち適切なアミノ酸バランスを求める必要性があった。よって、本研究の第 3 章では、とうもろこし-大豆油かすを主体としたブロイラー用配合飼料における制限アミノ酸に着目し、FCR 改善効果の高いアミノ酸の探索ならびに検討を行った。その結果、第一制限アミノ酸としては含硫アミノ酸 (TSAA) よりも Lys に対する反応が強く、数々の Lys に関する報告と同様に FCR が改善した (Kidd ら, 1998; Sterling ら, 2004; Razaei ら, 2004)。しかしながら、Lys 強化飼料の FCR および増体重に対する効果は一定水準でプラトーに達する傾向が見られた。一方で歩留りは飼料中の Lys 含量を強化するに従い改善する傾向も見られたことから、筋肉中の Lys の蓄積としてはまだプラトーに達していない可能性が鑑みられた。したがって、Lys の更なる有効活用法について模索するため、本論では第三制限アミノ酸とされるスレオニン (Thr) との関係に着目した。この試験では、飼料中の有効 Lys 含量をチャンキーマニュアル 2009 年度版 (CHM2009) のフィニッシャー 2 の推奨値を基準として 110% に高め、有効 Thr 含量について幾つかの報告 (Kidd ら, 2004; Everett ら, 2010; Mejia, 2012) によって最適な Thr/Lys 比とされる 0.68 に合わせて強化した。給与試験の結果、有効 Thr 強化によって増体重は変わらないものの、飼料摂取量が減少することで FCR が改善した。この結果から、飼料中の有効 Lys を強化と Thr の最適比率を組み合わせることで、更に FCR を改善することが期待された。本論において最後となる給与試験では高 Lys 飼料 (ROSS308 マニュアル 2007 年度版の推奨値の 150% 水準) に対し、Thr/Lys 比 0.68 とした飼料の評価を行った。その結果、試験期間における増体重は対照飼料の給与群と比較して高 Lys 飼料給与群で有意に増加し、FCR も有意に低下した。一方、有効 Thr を Thr/Lys 比 0.68 になるように設計した高 Lys+Thr 飼料給与群では対照群に対し、飼料摂取量が減少する傾向があり FCR は改善したものの増体重は改善しなかった。各アミノ酸間における適正比率は様々な研究から明らかになってきているが、1 種のアミノ酸 (本試験では Lys) を強化した際に、必ずしもその比率に従って一方のアミノ酸 (本試験では Thr) を強化すれば生産成績が改善するわけではないことが示唆された。なお、この知見は高 Lys 飼料と比較して、Thr/Lys 比を 0.68% とする Thr の強化ではブロイラーの増体重を改善することができないことを示した

最初の証拠を提示した結果といえる。

本論文で示してきたこれまでの研究成果は仮説を積み上げ試験を実施することで検証してきた。しかしながら、先述の高 Lys 水準下において最適比率とされる Thr/Lys 比 0.68 が必ずしも生産効率を改善しないことを示した結果も、その根拠については憶測の域を出ない。そこで、本試験によって得られたニワトリの血液を用いて網羅的なメタボローム解析を実施し、生産性能を改善する根底にあるメカニズムについて解明することを試みた（第 4 章）。その結果、Lys の代謝産物や尿素回路に関連する代謝産物は一般に報告されているような傾向が観察された。すなわち、血液中において 2-アミノアジピン酸やピペコリン酸といった Lys 代謝産物が増加したが、これは同様の試験系において Watanabe ら（2015）が報告した浅筋肉中での代謝産物の変化と同様であった。また、高 Lys 飼料を摂取するとアルギニン（Arg）との間に Lys-Arg 拮抗作用が誘導されることが知られている（Austic と Scott, 1975）。Lys-Arg 拮抗作用はヒナを用いた試験によって飼料摂取量の低下のほか、グリシン・アミジノ・トランスフェラーゼ活性の低下、腎臓アルギナーゼによる Arg 分解の増加および尿中 Arg の増加などが起こると考えられている（Jones ら, 1967; Austic と Nesheim, 1970; Wang と Nesheim, 1972）。本試験では、Arg、オルニチン、シトルリン、尿素および尿酸を含む尿素サイクルに関連する代謝産物は、対照群と比較して高 Lys 給与群で減少する傾向が見られており、分解が進んでいたものと推測される。しかしながら、高 Lys 飼料給与群における飼料摂取量はむしろ増加傾向にあった。Nesheim ら（1972）によると、Lys-Arg 拮抗作用は鶏の品種の系統によっても反応が異なることを示唆しており、現代の高増体ブロイラーが本試験レベルの Lys 強化は寛容することができ、生産性能に対して悪影響を与えない可能性が示唆された。なお、一般的に Arg/Lys 比は 1.00 を超えないように有効 Lys および有効 Arg は設計される。この比率が 1.00 を下回っても生産成績が改善した研究の一つとして、Labandan ら（2001）の 0.85 程度の報告があるが、Arg/Lys 比 0.68 でも生産性が改善した本試験結果は新しい知見といえる。さらに今回の網羅的なメタボローム解析によって、他にも多くの血中代謝産物に変化したが、その中でも特徴的な代謝産物としてセロトニンが検出された。セロトニンには中枢神経系と末梢系の独立した作動系が存在する。中枢神経系における役割は多く解明されている一方で、末梢系では役割について過去から報告されているものの作用機序については未解明なことも多い。末梢系での最近の研究として、

セロトニン作動性に関連し得る慢性的なストレス環境下において、ブロイラー飼料中にトリプトファンを補給することで FCR を改善した報告がある (Yue, 2017)。本論の試験結果から、高血漿セロトニン濃度が高 Lys 飼料を給与したニワトリにおいて検出され、血漿セロトニン濃度は FCR との間に負の相関が得られた。この結果は、血漿セロトニン濃度が肥育後期におけるブロイラーの FCR に関与していることを示唆している。しかしながら、セロトニンの基質であるトリプトファンの血中濃度には各試験区間で変化が見られておらず、同じ作用機序によって血中のセロトニン濃度が変動したものとは考え難い。したがって、本研究の結果からのみでは、高 Lys 飼料を給与したニワトリにおいて血漿セロトニン濃度が増加した理由は推測できない。しかしながらこの結果は、ブロイラーにおける末梢セロトニンの新たな代謝的役割を示すものであると共に、血漿セロトニン濃度が肥育後期の現代の高増体ブロイラーにおいて、FCR を改善するためのバイオマーカーになり得る可能性を示唆する新たな知見であるといえる。

現代の高増体ブロイラーの遺伝的能力を発揮し、FCR を改善するための栄養素組成を迅速に判断するための指標の確立は、常日頃から変化するブロイラーにいち早く飼料栄養を適合させるために有効な手法であるものと考えられる。本研究によって探索されたセロトニンは、FCR 改善のための血中バイオマーカーとして用いる評価系に応用できる可能性を示したが、今後は各栄養試験の結果との相関を取り、例数を増やして検証していく必要がある。しかしながら、畜産・家禽学においてまだ数多くないメタボロミクスの技術を用いて得た新規的な知見であり、ブロイラー産業界に貢献するための第一歩となる技術基盤であるといえる。

参考文献・引用文献

参考文献

Ahmadi H and Golian A. The integration of broiler chicken threonine responses data into neural network models. *Poultry Science*, 89: 2535-2541. 2010.

Austic RE and Nesheim MC. Role of kidney arginine in variations of arginine requirement of chicks. *The Journal of Nutrition*, 100: 855-867. 1970.

Austic RE and Scott RL. Involvement of food intake in the lysine-arginine antagonism in chicks. *The Journal of Nutrition*, 105: 1122-1131. 1975.

Barnes NA and Sharp T. A review of central 5-HT receptors and their function. *Neuropsychopharmacology*, 38: 1083-1152. 1999.

Boe J, Simonsson B and Stahl E. Effect of histamine, 5-hydroxytryptamine and prostaglandins on isolated pulmonary arteries. *European Journal of Respiratory Diseases*, 61: 12-19. 1980.

Brake J, Balanave D and Dibner JJ. Optimum dietary arginine:lysine ratio for broiler chickens is altered during heat stress in association with changes in intestinal uptake and dietary sodium chloride. *British Poultry Science*, 39: 639-647. 1998.

Camilleri M. Serotonin in the gastrointestinal tract. *Current Opinion in Endocrinology, Diabetes and Obesity*, 16(1): 53-59. 2009.

Dozier WA III, Corzo A, Kidd MT and Branton SL. Dietary apparent metabolizable energy and amino acid density effects on growth and carcass traits of heavy broilers. *The Journal of Applied Poultry Research*, 16: 192-205. 2007.

Dozier WA III, Kidd MT and Corzo A. Dietary amino acid responses of broiler chickens. *The Journal of Applied Poultry Research*, 17: 157-167. 2008.

Dozier WA III, Gehring CK, Corzo A and Olanrewaju HA. Apparent metabolizable energy needs of male and female broilers from 36 to 47 days of age. *Poultry Science*, 90: 804-814. 2011.

Erspamer V and Vialli M. Ricerche sul secreto delle cellule enterocromaffini. *Bollettino della Società Medico Chirurgica di Pavia*, 51: 357-363. 1937.

Everett DL, Corzo A, Dozier WA III, Tillman PB and Kidd T. Lysine and threonine responses in Ross TP16 male broilers. *The Journal of Applied Poultry Research*, 19: 321-326. 2010.

Fanburg BL and Lee SL. A new role for an old molecule: serotonin as a mitogen. *American Journal of Physiology*, 272: L795-L806. 1997.

Gershon MD. Nerves, reflexes, and the enteric nervous system: pathogenesis of the irritable bowel syndrome. *Journal of Clinical Gastroenterology*. 39(5): S184-S193. 2005.

Gershon MD and Tack J. The serotonin signaling system: from basic understanding to drug development for functional GI disorders. *Gastroenterology*, 132: 397-414. 2007.

Han Y and Baker DH. Digestible lysine requirement of male and female broiler chicks during the period three to six weeks posthatching. *Poultry Science*, 73(11): 1739-45. 1994.

Jensen LS, Wyatt CL and Fancher BI. Sulfur amino acid requirement of broiler chickens from 3 to 6 week of age. *Poultry Science*, 68: 163-168. 1989.

Jones JD, Petersburg SJ and Burnett PC. The Mechanism of the Lysine-Arginine Antagonism in the Chick: Effect of lysine on digestion, kidney arginase, and liver transamidinase. *The Journal of Nutrition*, 93(1): 103-116. 1967.

Kamran Z, Sarwar M, Nisa M, Nadeem MA, Ahmad S, Mushtaq T, Ahmad T and Shahzad MA. Effect of lowering dietary protein with constant energy to protein ratio on growth, body composition and nutrient utilization of broiler chicks. Asian-Australasian Journal of Animal Science, 21(11): 1629-1634. 2008.

Keszthelyi D, Troost FJ and Masclee AAM. Understanding the role of tryptophan and serotonin metabolism in gastrointestinal function. Neurogastroenterology and Motility, 21: 1239-1249. 2009.

Keszthelyi D, Troost FJ, Jonkers DM, van Eijk HM, Lindsey, Dekker J, Buurman WA and Masclee AAM. Serotonergic reinforcement of intestinal barrier function is impaired in irritable bowel syndrome. Alimentary Pharmacology and Therapeutics, 40: 392-402. 2014.

Kerr BJ, Kidd MT, Halpan KM, Macward GW and Quarles CL. Lysine Level Increases Live Performance and Breast Yield in Male Broilers. Journal Applied Poultry Research, 8: 381-390. 1999.

Kidd MT, Kerr BJ and Anthony NB. Dietary interactions between lysine and threonine in broilers. Poultry Science, 76: 608-614. 1997.

Kidd MT, Kerr BJ, Halpan KM, Mcward GW and Quarles CL. Lysine levels in starter-finisher diets affect broiler performance and carcass traits. Journal Applied Poultry Research, 7: 351-358. 1998.

Kidd MT, McDaniel CD, Branton SL, Miller ER, Boren BB and Fancher BI. Increasing amino acid density improves live performance and carcass yields of commercial broilers. The Journal of Applied Poultry Research, 13: 593-604. 2004a.

Kidd MT, Corzo A, Hoehler D, Kerr J, Barber J and Branton SL. Threonine needs

of broiler chickens with different growth rates. Poultry Science, 83: 1368-1375. 2004b.

Kim HJ, Kim JH, Hoh S, Hur HJ, Sung MJ, Hwang JT, Park JH, Yang JY, Kim MS, Kwon DY and Yoon SH. Metabolomic Analysis of Livers and Serum from High-Fat Diet Induced Obese Mice. Journal of Proteome Research, 10(2): 722-731. 2011.

Kobayashi H, Eguchi A, Takano W, Shibata M, Kadowaki M and Fujimura S. Regulation of muscular glutamate metabolism by high-protein diet in broiler chicks. Animal Science Journal, 82: 86-92. 2011.

Koide K, Ohta Y, Ito M, Watanabe E, Toyomizu M and Ishibashi T. Primary experiment for determination of sulfur-containing amino acid requirement in female broilers affected by age. Japanese Poultry Science, 30: 31-39. 1993.

Labadan MC Jr., Hsu K-N and Austic RE. Lysine and arginine requirements of broiler chickens at two to three-week intervals to eight weeks of age. Poultry Science, 80: 599-606. 2001.

Leclercq B. Specific effects of lysine on broiler production: comparison with threonine and valine. Poultry Science, 77: 118-123. 1998.

Leeson S, Caston L and Summers JD. Broiler response to diet energy and protein dilution in the finisher diet. Poultry science, 75: 522-528. 1996a.

Leeson S, Caston L and Summers JD. Broiler response to diet energy. Poultry science, 75: 529-535. 1996b.

Leibowitz SF and Alexander JT. Hypothalamic serotonin in control of eating behavior, meal size, and body weight. Biological Psychiatry, 44: 851-864. 1998.

Mbajorgu CA, Ng'ambi JW and Norris DD. Voluntary feed intake and nutrient

composition in chickens. Asian Journal of Animal and Veterinary Advances, 6(1):20-28. 2011.

Mehri M, Davarpanah A and Mirzaei HR. Estimation of ideal ratios of methionine and threonine to lysine in starting broiler chicks using response surface methodology. Poultry Science, 91: 771-777. 2012.

Mejia L, Tillman PB, Zumwalt CD and Corzo A. Assessment of the threonine-to-lysine ratio of male broilers from 35 to 49 days of age. The Journal of Applied Poultry Research, 21: 235-242. 2012.

Mohammad JB. Estimation of dietary threonine requirement for starter period of broilers based on the performance and immune responses criterion. International Research Journal of Applied and Basic Sciences, 5 (3): 412-416. 2013.

Mohammad-Zadeh LF, Moses L and Gwaltney-Brant SM. Serotonin: a review. Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics, 31: 187–199. 2008.

Nemecek GM, Coughlin SR, Handley DA and Moskowitz MA. Stimulation of aortic smooth muscle cell mitogenesis by serotonin. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 83: 674-678. 1986.

Nesheim MC. Kidney Arginase Activity and Lysine Tolerance in Strains of Chickens Selected for a High or Low Requirement of Arginine. The Journal of Nutrition, 95(1): 79-87. 1968

O'Dell BL and Savage JE. Arginine-lysine antagonism in the chick and its relationship to dietary cations. The Journal of Nutrition, 90: 364–370. 1966.

Pesti GM. Impact of dietary amino acid and crude protein levels in broiler feeds on biological performance. The Journal of Applied Poultry Research, 18: 477-486. 2009.

Petri A and Lemme A. Trends and latest issues in broiler diet formulation. Lohmann Information, 42(2):25-38. 2007.

Rapport M, Green A and Page I. Crystalline serotonin. Science, 108: 329-330. 1948.

Rapport M. Serum vasoconstrictor (serotonin) the presence of creatinine in the complex; a proposed structure of the vasoconstrictor principle. Journal of Biological Chemistry, 180(3): 961-9. 1949.

Rezaei M, Moghaddam HN, Reza JP and Lermanshahi H. The effects of dietary protein and lysine levels on broiler performance, carcass characteristics and N excretion. International Journal of Poultry Science, 3(2): 148-152. 2004.

Richards MP. Genetic regulation of feed intake and energy balance in poultry. Poultry Science, 82: 907-916. 2003.

Sigolo S, Zohrabi Z, Gallo A, Seidavi A. and Prandini A. Effect of low crude protein diet supplemented with different levels of threonine on growth performance, carcass traits, blood parameters, and immune responses of growing broilers. Poultry Science, 96: 2751-2760. 2017.

Sreekumar A, Poisson LM, Rajendiran TM, Khan AP, Cao Q, Yu J, Laxman B, Mehra R, Lonigro RJ, Li Y, Nyati MK, Ahsan A, Kalyana-Sundaram S, Han B, Cao X, Byun J, Omenn GS, Ghosh D, Pennathur S, Alexander DC, Berger A, Shuster JR, Wei JT, Varambally S, Beecher C and Chinnaiyan AM. Metabolomic profiling reveals a role for caspase-2 in lipoapoptosis. Nature, 457(7231): 910-4. 2009.

Spiller R. Serotonin and GI clinical disorders. Neuropharmacology, 55: 1072-1080. 2008.

Sterling KG, Pesti GM and Bakalli RI. Performance of different broiler genotypes fed diets with varying levels of dietary crude protein and lysine. *Poultry Science*, 85: 1045-1054. 2004.

Sugahara M, Baker DH, Scott HM. Effect of different patterns of excess amino acids on performance of chicks fed amino acid-deficient diets. *The Journal of Nutrition*, 97(1): 29-32. 1969.

Tachibana T, Tazawa T and Sugahara K. Feeding increase 5-hydroxytryptamine and norepinephrine within the hypothalamus of chicks. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 130(4): 715-722. 2001.

Takahashi K, Konashi S, Akiba Y and Horiguchi M. Effect of dietary methionine and dispensable amino acid supplementation on abdominal fat deposition in male broilers. *Animal Science and Technology (Japan)*, 65: 244-250. 1994.

Takahashi K and Akiba Y. Effect of methionine supplementation on lipogenesis and lipolysis in broiler chicks. *Japanese Poultry Science*, 32: 99-106. 1995.

Tomonaga S, Okuyama H, Tachibana T and Makino R. Effects of high ambient temperature on plasma metabolomic profiles in chicks. *Animal Science Journal*, 89(2): 448-455. 2018.

Ueland PM, Ulvik A, Rios-Availa L, Midttun O and Gregory JF. Direct and Functional Biomarkers of Vitamin B6 Status. *Annual Review of Nutrition*, 35: 33-70. 2015.

Wang S-H and Nesheim MC. Degradation of Lysine in Chicks. *The Journal of Nutrition*, 102(5): 583-96. 1972.

Watanabe G, Kobayashi H, Shibata M, Kubota M, Kadowaki M and Fujimura S. Regulation of free glutamate content in meat by dietary lysine in broilers. *Animal*

Science Journal, 86: 435-442. 2015.

Watanabe H, Nakano T, Saito R, Akasaka D, Saito K, Ogasawara H, Minashima T, Miyazawa K, Kanaya T, Takakura I, Inoue N, Ikeda I, Chen X, Miyake M, Kitazawa H, Shirakawa H, Sato K, Tahara K, Nagasawa Y, rose MT, Ohwada S, Watanabe K and Aso H. Serotonin improves high fat diet induced obesity in mice. PLoS ONE, 11 (1): e0147143. 2016.

Wheeler KB and Latshaw JD. Sulfur amino acid requirement and interactions in broilers during two growth periods. Poultry Science, 60: 228-236. 1981.

Wijtten PJA, Lemme A and Langhout. Effects of different dietary ideal protein levels on male and female broiler performance during different phases of life: Single phase effects, carryover effects, and interactions between phases. Poultry Science, 83: 2005-2015. 2004.

Yue Y. Guo Y and Yang Y. Effect of dietary L-tryptophan supplementation on intestinal response to chronic unpredictable stress in broilers. Amino Acids, 49 (7): 1227-1236. 2017.

Zhai W, Peebles ED, Mejia L, Zumwalt CD and Corzo A. Effects of dietary amino acid density and metabolizable energy level on the growth and meat yield of summer-reared broilers. Journal Applied Poultry Research. 23: 501-515. 2014.

太田能之. ブロイラーにおける含硫アミノ酸の利用と要求量. 日本家禽学会誌, 36 巻 2 号: 75-82. 1999.

参考図書

Leeson S and Summers JD. Commercial poultry nutrition 3rd edition. Nottingham university. Press, Guelph, Ontario. 2008.

National Research Council. The Nutrient Requirements of Poultry. 9th revised edition. National Academies. Press, Washington, DC. 1994.

Payne CG. Layer response to energy. Environmental Control of Poultry Production. P40-54, T. C. Carter, ed. Longmans. Press, London, UK. 1967.

United Nations. Population division. Department of economic and affairs. World Population Prospect: The 2017 Revision. United Nations. Press, New York, 2018.

有吉修二郎 著. アミノ酸飼料学, チクサン出版社 出版. 東京. 1983.

奥村純市、田中圭一 編, 寺島福秋、阿部又信、左久、秋葉征夫、矢野秀雄、藤原勉 著. 動物栄養学. 朝倉書店 出版. 東京. 1995.

奥村純市、藤原昇 編. 家禽学. 朝倉書店 出版. 東京. 2000.

唐澤豊 編. 動物の栄養. 文永堂出版 出版. 東京. 2001.

羊土社. 実験医学 メタボローム～代謝研究の新潮流. Vol.26 No.1. 羊土社出版. 東京. 2008.

参考報告書

国土交通省 総合政策局 観光事業課. 多様な食文化・食習慣を有する外国人客への対応マニュアル～外国人のお客様に日本での食事を楽しんでもらうために～. (2008年2月). 2008.

独立行政法人農畜産業振興機構 (ALIC). 畜産の情報 (海外編) (2010年3月)内、資料 タイ国家経済社会開発委員会、タイブロイラー加工輸出業者協会「タイにおける一人当たり鶏肉消費量の推移」. 2010.

農林水産政策研究所. 世界の食料需給の動向と中長期的な見通し～世界食料

需給モデルによる 2027 年の世界食料需給の見通し～. (2018 年 3 月) . 2018.

ブルース・エバンス. 第 95 回技術ゼミナールテキスト, Current performance and future trends. 日本チャンキー協会 発行. 岡山. 2012.

引用文献・図書

Leeson S, Caston L and Summers JD. Broiler response to diet energy and protein dilution in the finisher diet. Poultry science, 75: 522-528. 1996a. P526 Table 7, Table 8.

有吉修二郎 著. アミノ酸飼料学, P94, 表 6-6. チクサン出版社 出版. 東京. 1983.

石井俊行.ブロイラー飼料を考える③ 有効アミノ酸の考え方と重要性, 鶏卵肉情報 2017 年 1 月 25 日号, P33, 表 2. 株式会社鶏卵肉情報センター 出版. 東京. 2017.

日本チャンキー協会. ブロイラー 管理マニュアル 2009 年度版, P101, 付録 5 出荷体重 3.0kg 以上 無鑑別飼育用飼料成分, チャンキー. 株式会社日本チャンキー 発行. 岡山. 2009.

参考 Web サイト

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Web.

<http://www.fao.org/home/en/>

Accessed on October 28, 2018

Human Metabolome Technologies Inc. Web.

<https://humanmetabolome.com/rd/technology>

Accessed on November 11, 2018

ROSS An Aviagen Brand Web.

<http://ap.aviagen.com/brands/ross/>

Accessed on October 28, 2018

農林水産省 Web.

<http://www.maff.go.jp/>

Accessed on November 11, 2018

その他資料

メタボローム解析試験報告書「CE-TOFMS による養鶏血漿のメタボローム解析」(報告書番号: NOSAN-HMT-001), ヒューマン・メタボローム・テクノロジー株式会社 作成. 山形. 2015.

謝 辞

本研究および論文作成にあたり、多大なご指導ならびにご助言を賜りました東京農工大学 佐藤幹教授に心より深く感謝致します。

副査・審査をお引き受けくださり、多くの貴重なご助言をいただきました東京農工大学 新井克彦教授、宇都宮大学 吉澤史昭教授、茨城大学 豊田淳准教授、東京農工大学 新村毅准教授に深く感謝致します。

本研究で用いたメタボローム解析の遂行にあたり、東京農工大学 野口恵一准教授には質量分析に関する基礎的知見や技法について多くのサポートをいただきました。また、新潟大学 藤村忍教授、新潟大学 甲斐慎一博士には血漿アミノ酸等、代謝産物の分析において多大なご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表わします。

本研究を遂行する上で、供試動物であるブロイラーならびに試験場所を含む設備・環境は日本農産工業株式会社よりご提供いただきました。深謝致します。また、社会人特別選抜による博士課程への挑戦に対してご理解を示し、社内調整を図っていただいた上、多くのご助言をいただきました研究開発センター長（現ヨード卵部長）伊藤博史博士に深く感謝致します。養鶏グループリーダーの三宅正志博士をはじめ、権藤浩司研究員、芝田晃一研究員ならびに岡庭就祐研究員には、研究を遂行させる上で数々のご助言ならびに動物の管理・分析等、様々な面においてご協力いただきました。深く感謝致します。

本研究をお手伝いいただき、応援してくださった東京農工大学畜産学研究室ならびに日本農産工業株式会社畜産技術センター・品質保証部の皆様におかれましては、とてもお世話になりました。感謝致します。

社会人としての仕事を全うしつつ、研究活動を行うためには、家族の協力・支援なしでは絶対に進めることはできませんでした。本研究および論文作成を支えてくれた家族に感謝します。伸子、志弥、智陽、心からありがとう。

最後に本研究に関わりご支援いただきました、すべての皆様に心から感謝すると共に御礼申し上げます。誠にありがとうございました。